

UNTERSUCHUNGEN ZUR FERNANALYSE
DER ERDOBERFLÄCHE
DURCH SPEKTROSKOPISCHE
RÜCKSTREUMESSUNG
INFRAROTER LASER-STRAHLUNG

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von

Ruprecht Steinmann

aus Nordhausen/Thür.

1979

1980

UNTERSUCHUNGEN ZUR FERNANALYSE
DER ERDOBERFLÄCHE
DURCH SPEKTROSKOPISCHE
RÜCKSTREUMESSUNG
INFRAROTER LASER-STRAHLUNG

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von

Ruprecht Steinmann

aus Nordhausen/Thür.

1979



1. Berichterstatter: Prof. Dr. J. Bodechtel
 2. Berichterstatter: Prof. Dr. D. Klemm
- Tag der mündlichen Prüfung: 21. Februar 1980

	Seite
1. EINLEITUNG	7
2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER MESSUNGEN	9
2.1 Grundlagen der Fernerkundung	9
2.1.1 Das elektromagnetische Spektrum	9
2.1.2 Sensoren der Fernerkundung	11
2.1.3 Fernerkundungsplattformen	13
2.1.4 Anwendung der Fernerkundung	14
2.1.5 Atmosphärische Vorgänge	14
2.1.6 Korrekturmöglichkeit der gestörten Signale	16
2.2 Grundlagen des LASER-Rückstreu-Meßverfahrens	17
2.2.1 Reflexion fester Materialien	17
2.2.2 Schwingungsverhalten von Kristallen	18
2.2.3 Einfluß von Streureflexion	21
2.2.4 Wirkungsweise abstimmbarer Kohlendioxid-LASER	25
2.2.5 LASER-Reflexionsspektroskopie — Ein neues Verfahren zur Fernerkundung der Erde	26
3. ENTWICKLUNG EINER LASER-SPEKTROMETERANLAGE UND LABORUNTERSUCHUNGEN	27
3.1 Versuchsanordnung	27
3.2 Versuchsdurchführung	27
3.3 Ergebnisse und Diskussion der Laboruntersuchungen	31
3.3.1 Allgemeines	31
3.3.2 LASER-Rückstreuungsmessungen an ausgewählten Mineralen	34
3.3.3 Untersuchungen an Böden	36
3.3.3.1 Spezielle Untersuchungen an Bodenkolloiden	36
3.3.3.2 Messungen an natürlichen Bodenproben	45
3.3.4 Messungen an Gesteinsproben	47
3.3.5 Messungen an Vegetation und Wasser, Bodenfeuchteuntersuchungen	52
3.3.6 Messungen an Kaolin-Roherde zur Vorbereitung von Fernmessungen	59
4. ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG EINES FLUGZEUGGETRAGENEN LASER-FERNANALYSEGERÄTES	62
4.1 Bau des Gerätes	62
4.1.1 Allgemeines	62
4.1.2 Prinzipieller Aufbau	62
4.1.3 Allgemeines zum optischen System	62
4.1.4 Vorerprobung	66

4.2	Ergebnisse und Diskussion der Pilotmission	66
4.2.1	Allgemeines	66
4.2.2	Fernmessungen der Kaolinlagerstätte Hirschau-Schnait- tenbach	73
4.3	Allgemeines zum Testgebiet Hirschau.....	73
5.	SCHLUSSFOLGERUNGEN IM HINBLICK AUF DIE GEOLOGI- SCHE NUTZBARMACHUNG DES VERFAHRENS UND AUS- BLICK.....	77
5.1	Geowissenschaftliche Relevanz.....	77
5.2	Vorschlag für ein Verfahren zur Aufsuchung von Kohlen- wasserstoff-Lagerstätten	78
5.3	Vorschlag für ein flugzeuggetragenes Seitensicht-LASER- RADAR-Gerät (LIDAR)	78
5.4	Vorschlag einer Sonde für LASER-spektroskopische Unter- suchungen in Erdbohrlöchern	79
6.	ZUSAMMENFASSUNG	84
7.	LITERATURVERZEICHNIS	85
8.	ANHANG	88
	Mögliche Wellenlängen des CO ₂ -LASERS	

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	1
Fernerkundungssensoren beeinflussende Reflexion der Karbonate im infraroten Wellenlängenbereich	2
Abhängigkeit des Reflexionsgrades vom Auftreffwinkel bei Quarzsand	3
Kornkurven im Wahrscheinlichkeitsnetz aus dem äolischen Bereich	4
Kornkurven im Wahrscheinlichkeitsnetz aus dem litoralen Bereich	5
Die Fundamentalschwingungen des CO ₂ -Moleküls	6
Abstimmbarer CO ₂ -LASER in gefalteter Ausführung	7
Anordnung zur Messung von Reflexionsspektren	8
LASER-spektroskopische Laboreinrichtung	9
Laboraufbau zur vergleichenden LASER-Spektroskopie an verschiedenen Bodenarten	10
Laboraufbau für LASER-Spektroskopie an Gesteinen	11
Laboraufbau für LASER-Spektroskopie an Vegetationsproben ...	12
Reflexionsspektrum von Quarz	13
Reflexionsspektrum von Kalkspat	14
Reflexionsspektrum von Orthoklas	15
Reflexionsspektrum von Talk	16
Reflexionsspektrum von Muskovit	17
Reflexionsspektrum von Biotit	18
Reflexionsspektrum von Montmorillonit	19
Reflexionsspektrum von Chlorit	20
Reflexionsspektrum von Kaolinit	21
Reflexionsspektrum von Chrysotil	22
Reflexionsspektrum von Epidot	23
Reflexionsspektrum von grüner Hornblende	24
Reflexionsspektrum von Olivin	25
Reflexionsspektren verschiedener Bodentypen	26
Reflexionsspektrum von Granit	27
Reflexionsspektrum von Gabbro	28

Reflexionsspektrum von Quarz-Diorit	29
Reflexionsspektrum von Syenit	30
Reflexionsspektrum von Trachyt	31
Reflexionsspektrum von Basalt	32
Reflexionsspektrum von Labradorit	33
Reflexionsspektrum von Tonstein	34
Reflexionsspektrum von Hornblende-Andesit	35
Reflexionsspektrum von Vegetation	36
Reflexionsspektrum einer Wasseroberfläche	37
Verhältnis der reflektierten Intensitäten in Abhängigkeit vom Wassergehalt	38
Reflektierte Intensitäten in Abhängigkeit vom Wassergehalt	39
Reflektierte Intensitäten im 9 μm -Bereich	40
Reflektierte Intensitäten im 10 μm -Bereich	41
Reflexionsspektrum von Kaolinroherde	42
Röntgenbeugungsdiagramm von Kaolinroherde	43
Ansicht des Meßflugzeuges DO 28	44
Ansicht des LASER-Meßsystems in eingebautem, betriebsbereitem Zustand	45
Schematische Darstellung des optischen Systems	46
Lageplan des Meßsystems im Flugzeug DO 28	47
Blick auf die Bedienungskonsole des Meßsystems	48
Überfliegen einer Braunkohlengrube	49
Überfliegen der Kaolinlagerstätte Hirschau-Schnaittenbach	50
1. und 2. Flug	
Überfliegen der Kaolinlagerstätte Hirschau-Schnaittenbach	51
3. Flug	
Kaolintagebau Hirschau, normierte Rückstreuung der Quarz-Reststrahlenbande	52
Übersichtskarte der Kaolinvorkommen in der Oberpfalz	53
Prinzip des Seitensicht-LIDAR	54
Schematischer Längsschnitt durch die Bohrlochsonde	55
Optische Einrichtung der Bohrlochsonde	56
Blockschaltbild des elektrischen Systems	57

ÜBERSICHT

Es wurde ein neuartiges Verfahren zur Fernanalyse der Erdoberfläche (30) auf der Grundlage der Laserreflexionsspektroskopie entwickelt.

Nach dem Aufbau einer dem Verfahren entsprechenden Laborversuchsanlage wurden im Rahmen einer methodischen Erprobung systematisch für die Erdoberfläche repräsentative Proben von Mineralien, Böden, Wasser und Vegetation untersucht.

Aufbauend auf den Laborergebnissen wurde ein Laserspektrometer für den Einsatz vom Flugzeug aus gebaut. In mehreren Versuchsflügen konnten erste Mineralanalysen der überflogenen Erdoberfläche aus Höhen bis zu 1000 Meter durchgeführt werden.

Für die Weiterentwicklung des Verfahrens wird ein zweidimensional oberflächenanalysierendes Laser-Radar-Gerät nach dem Seitensichtprinzip, ein Verfahren zur Aufsuchung von Kohlenwasserstofflagerstätten aufgrund der selektiven Absorption für Laser-Strahlung von Kohlenwasserstoff-Sickergasen und eine Bohrlochsonde zur Analyse des anstehenden Gesteins in Erdbohrungen vorgeschlagen (31).

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Programms zur Förderung der Erderkundung und der Atmosphärenforschung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie.

Herrn Prof. Bodechtel danke ich aufrichtig für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit.

Mit Herrn Prof. Klemm führte ich Diskussionen und erhielt von ihm wertvolle Anregungen und Hinweise.

Herr Dr. Reinhard, Direktor am Institut für Physik der Atmosphäre der DFVLR, stellte einen Arbeitsplatz zur Verfügung.

Herr Mörl unterstützte mich beim Aufbau der Laboranlage und bei der Durchführung der Flugerprobung.

Zahlreiche Diskussionen führte ich mit den Herren Prof. Gürs und Dr. Englisch am Battelle Institut.

Ich möchte allen genannten Herren für ihr Interesse und ihre Unterstützung sehr herzlich danken.

Besonders zu Dank verpflichtet bin ich auch meinen vorgesetzten Herren bei der DFVLR, die mir die Durchführung der Arbeit ermöglicht haben.

1. Einleitung

Ein rasches Anwachsen der Weltbevölkerung und der Weltwirtschaft führen zu ständig steigender Nachfrage nach Rohstoffen und Energie. Als logische Konsequenz müssen die Methoden zur Aufsuchung der begrenzten Rohstoff-Vorräte immer mehr verfeinert werden. Die klassischen bodengebundenen Methoden zur Erforschung der Erde reichen insbesondere dann nicht aus, wenn große Flächen in schwer zugänglichen Gebieten zu erkunden sind. Die steigenden Anforderungen an die Erderkundung lassen sich nur noch unter Zuhilfenahme von Fernerkundungstechniken mit Flugzeugen und Erdsatelliten als Träger lösen.

Bei allen Methoden werden von der Erde abgestrahlte oder reflektierte Felder auf ihren Informationsgehalt über die Erdoberfläche mit Hilfe der unterschiedlichsten Sensoren untersucht. Eine hervorragende Bedeutung haben die Felder der elektromagnetischen Wellen, die entweder von der Erde direkt abgestrahlt werden oder aus anderen Quellen stammen und an ihr reflektiert werden.

Träger der Informationen sind dabei die unterschiedlichen spektralen Intensitäten in Abhängigkeit von dem optisch selektiven Verhalten der Erdoberfläche.

Besonders geeignet sind die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes und des nahen infraroten Lichtes, da die Sonne als Strahlungssender Verwendung finden kann.

Sucht man jedoch nach einem Verfahren, das eine chemische und mineralogische Analyse der Erdoberfläche ermöglicht, so muß man die Wellenlängen des mittleren infraroten Lichtes wählen, die direkt mit den Kristallgittereigenresonanzfrequenzen der zu untersuchenden Stoffe in Wechselwirkung stehen. Dieses Phänomen wurde bereits um 1900 von Coblentz (5, 6) systematisch untersucht. Inzwischen ist die Infrarotspektroskopie mit automatisch aufzeichnenden Spektralphotometern zur Standardausrüstung mineralogischer Institute geworden.

Im Rahmen der ersten mondumkreisenden Weltraummissionen hat R. J. P. Lyon 1962 aus weltweiten Nachforschungen 440 Arbeiten über die mineralogische Anwendung der Infrarotspektroskopie zusammengetragen, um nach einer Möglichkeit zu suchen, ein Fernerkundungsverfahren daraus zu entwickeln. Da jedoch die Strahlung der Sonne im Bereich um $10\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge, der sich für die meisten Minerale am besten eignet, praktisch zu vernachlässigen ist und auch die Wärmeeigenstrahlung der Oberfläche nicht stark genug ist, um eine ausreichende geometrische und spektrale Auflösung zu erzielen, brachten Flugversuche nur unbefriedigende Ergebnisse.

Die vorliegende Arbeit beschreibt nun die Entwicklung und methodische Erprobung eines neuen aktiven Verfahrens, das die Fernanalyse der Minerale der Erdoberfläche aufgrund ihres optisch-selektiven Verhaltens im mittleren Infrarot mit Hilfe der *Lasertechnologie* ermöglicht.

Durch die erreichbaren Sendeleistungen von abstimmbaren Moleküllasern ist es im Prinzip damit möglich, die Methoden der im Labor ausgereiften Infrarotspektroskopie zur Untersuchung fast aller festen, flüssigen und gasförmigen Medien auf die Fernerkundungstechnologie zu übertragen.

Für spektroskopische Rückstreumessungen besonders geeignet ist der Kohlendioxidlaser, dessen Emissionslinien mit den Kristallgittereigenresonanzfrequenzen der Silikate und vieler anderer Stoffe übereinstimmt. Da im so vorgegebenen Wellenlängenbereich ferner die Atmosphäre weitgehend transparent ist, besteht somit die Möglichkeit, ein Verfahren zur chemischen und mineralogischen Fernanalyse der Erdoberfläche durch spektroskopische Rückstreumessungen infraroter Laser-Strahlung zu entwickeln.

Ein vom Battelle-Institut in Frankfurt in Entwicklung befindliches LASER-Differential-Meßgerät zur Erkennung von Schadstoffen und Spurengasen in der Atmosphäre wurde auf Vorschlag und nach Angaben des Verfassers so konstruiert bzw. modifiziert, daß mit dem Gerät auch Fernmessungen an der Erdoberfläche möglich sind.

2. Physikalische Grundlagen der Messungen

2.1 Grundlagen der Fernerkundung

2.1.1 Das elektromagnetische Spektrum

Elektromagnetische Strahlung ist bestimmt durch Wellenlängen (λ) oder Frequenz (f), die sich verhalten wie

$$\lambda \cdot f = c$$

wobei c die absolute Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist ($3 \cdot 10^8$ m/sec). Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung reicht von den kurzen Röntgenstrahlen bis hin zu kilometerlangen Radiowellen.

Für die Anwendung in der Fernerkundung finden besonders zwei Bereiche bevorzugt Anwendung: Ultraviolett (UV) bis thermales Infrarot (IR), und Mikrowellen und Ultrakurzwellenbereich. Die Einengung in diese zwei Bereiche ist bedingt durch die Beeinträchtigung der übrigen Bereiche durch atmosphärische Einflüsse.

Für den ersten Bereich von 300 nm bis 20 μm ist die Atmosphäre relativ transparent, man unterteilt gewöhnlich in:

Nahes Ultraviolett	0,3 — 0,4 μm
Sichtbarer Bereich	0,4 — 0,75 μm
Nahes Infrarot	0,75 — 1,5 μm
Mittleres Infrarot	1,5 — 20 μm

Darüber ist die Atmosphäre, im fernen Infrarot 20 — 1000 μm , praktisch undurchsichtig.

Der zweite Bereich erstreckt sich dann von 1 mm (1000 μm , 300 GHz) bis ungefähr 30 cm (1 GHz). Darüber wirken die brechenden Einflüsse der Atmosphäre störend für eine Anwendung in der Fernerkundung.

Die passiven Erderkundungssysteme beruhen auf der Analyse der **reflektierten Komponenten** der Sonnenstrahlung, vom UV, sichtbaren Bereich und nahen IR, oder der **Emission** von Strahlung im mittleren IR und in Mikrowellenfrequenzen.

Aktive Erderkundung beruht auf der Reflexion von Strahlung künstlicher Strahlungsquellen an den zu beobachtenden Objekten. Für den Bereich von UV bis IR finden LASER Verwendung, im Mikrowellenbereich RADAR-Systeme.

Alle Körper mit einer Temperatur höher als absolut Null (0°K) emittieren Strahlung abhängig von ihrer Temperatur und Emissionsfähigkeit. Ein idealer Strahler wird als „Schwarzer Strahler“ bezeichnet und verhält sich nach dem „Planck’schen Strahlungsgesetz“. (11)

(E als Strahlungsdichte zwischen λ und $\lambda + d\lambda$):

$$E_{\lambda} d\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda$$

worin c_1 und c_2 Konstanten von den Beträgen

$$c_1 = 0,280 \cdot 10^{-12} \text{ cal } \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

und $c_2 = 1,438 \text{ cm} \cdot \text{grad}$ bedeuten.

Die Emissionsfähigkeit fester Körper ist auch eine Funktion der Wellenlänge, außerdem aber von Einfallswinkel, Oberflächenrauigkeit und anderen Faktoren abhängig. Bei allen Wellenlängen verhalten sich die Emissionsfähigkeit E_{λ} zur Absorptionsfähigkeit α_{λ} und Reflexionsfähigkeit ρ_{λ} wie

$$E_{\lambda} = \alpha_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda}$$

Das heißt, daß ein perfekter Strahler ebenso ein perfekter Absorber ist, jedoch kein Reflektor.

Die Veränderung der Emission, Absorption oder Reflektion einer Oberfläche mit der Wellenlänge wird bezeichnet als spektrale Signatur.

Da unterschiedliche Materialien spektrale Signaturen besitzen, ist durch eine Analyse des Spektrums eine Fernerkundung ermöglicht.

Maximale Strahlung bei gegebener Temperatur tritt bei der Wellenlänge auf, entsprechend dem Wien’schen Verschiebungsgesetz

$$\lambda_m \cdot T = 0,29 \text{ cm} \cdot ^{\circ}\text{K}$$

Bis auf die langen Wellenlängen über 1 cm strahlt die Sonne als „Schwarzer Strahler“ mit einer Temperatur von ungefähr 6000°K . Das bedeutet, daß ihr Strahlungsmaximum bei $0,5 \mu\text{m}$, also mitten im sichtbaren Bereich liegt.

Für die passiven Fernerkundungsverfahren ist die tägliche saisonelle und durch wechselnde Atmosphäreneinflüsse hervorgerufene Strahlungsänderung der Sonne von eminenter Bedeutung für das UV, sichtbaren Bereich und nahes Infrarot.

Für den mittleren und fernen Infrarot- und Mikrowellenbereich ist die unterschiedliche Sonneneinstrahlung ebenfalls von Einfluß.

Die in die Atmosphäre und Erde eingestrahlte Sonnenenergie, in Verbindung mit Strahlung, Wärmeleitung und Konvektion bestimmt hauptsächlich die Temperatur und Temperaturänderungen.

Außerhalb des Strahlungsmaximums im sichtbaren Bereich fällt die Sonnenleistung schnell ab.

Die Erdstrahlung ist bei $4\text{ }\mu\text{m}$ ungefähr gleich der Sonnenstrahlung. Bei Wellenlängen über $4\text{ }\mu\text{m}$ ist daher die Emission des beobachtenden Objektes bedeutender als die Reflexion.

Bei einer mittleren Erdtemperatur von 300° K liegt die maximale Emission bei ungefähr $10\text{ }\mu\text{m}$.

Im Mikrowellenbereich kann das Planck'sche Strahlungsgesetz dahingehend vereinfacht werden, daß man die Strahlung als direkt proportional zur Temperatur annimmt. (Raleigh-Jean's Approximation)

2.1.2 Sensoren der Fernerkundung

Um die von der Erdoberfläche oder Atmosphäre geprägte elektromagnetische Strahlung aufnehmen zu können und auf ihren Informationsgehalt hin zu analysieren, sind die unterschiedlichsten Geräte gebräuchlich oder im Stadium der Entwicklung.

Nachstehend angeführte Sensoren geben einen Überblick über die wichtigsten Typen.

1. *Bereich UV bis thermales IR*

A Passive Systeme

Abbildende Systeme

— Menschliches Auge

Maximale Empfindlichkeit bei 550 nm , der maximalen Strahlung der Sonne.

Spektralbereich ungefähr von 450 nm bis 720 nm .

— Photographie

Sehr gute geometrische Auflösung

Spektrale Auflösung abhängig von Filtersystem und verwendetem Film.

Spektralbereich von UV bis etwa $1\text{ }\mu\text{m}$.

— TV-Verfahren

Geometrische Auflösung abhängig von Zeilenzahl und Telemetrie.

Spektraler Bereich von UV bis IR abhängig vom Typ der Bildröhre und Filtersystem.

- Infrarot-Line-Scanner

Erzeugt breitbandige Thermalbilder.

Spektralbereich eingengt durch die atmosphärische Absorption von CO_2 und H_2O in entweder das 3—5 μm -Band oder das 8—13 μm -Band.

- Multispektraler Scanner (MSS)

Abbildendes System in vielen schmalen Bändern der Bereiche UV, Sichtbar und Infrarot.

Obige Sensoren sind abbildende Systeme, in denen flächige Bilder erzeugt werden können, in den Multibandsystemen wie in Multiband-Kameras und Scannern wird zusätzlich eine spektrale Information gewonnen.

Radiometer (nicht abbildende Systeme)

Systeme zur Gewinnung einer quantitativen Information über den Strahlungshaushalt (Temperatur, Strahlung, Reflexion) eines Objektes oder der dazwischen liegenden Atmosphäre.

Wird das Gesichtsfeld des Radiometers gescannt, entstehen flächige Bilder und das System ist abbildender Art. Jedoch auch für das nicht gescannte Radiometer bestehen eine große Anzahl von Anwendungsmöglichkeiten, wie der Temperaturmessung von Einzelobjekten und der Erzeugung von Temperaturprofilen.

B Aktive Systeme

- LIDAR (optisches RADAR)

Zur Messung des Reflexions- und Streuverhaltens der Erdoberfläche oder zur Messung atmosphärischer Verunreinigung aufgrund des Absorptionsverhaltens von Gasen und der Raman-Spektroskopie.

Zur Entfernungsmessung

- LASER-Scanner

Zur Erzeugung flächiger Bilder der Erdoberfläche mit Hilfe der Ausleuchtung der Szenerie mit LASER- anstatt mit Sonnenlicht.

2. Bereich: Mikrowellen

A Passive Systeme

- Passiver Mikrowellen-Radiometer

Für abbildende Anwendung und Radiometrie.

Die Anwendung wird begrenzt durch die großen Antennenausmaße zur Erzielung hinreichender Auflösung.

B Aktive Systeme

— Seitensicht (Radar (SLR, SAR))

Abbildendes System bei dem kohärente Radarimpulse die Szene beleuchten.

— Scatterometer

System zur Messung der Winkelabhängigkeit von Reflexion und Streuung der Radarimpulse an dem beobachteten Objekt.

2.1.3 Fernerkundungsplattformen

Grundsätzlich unterscheidet man drei Typen von Sensor-Plattformen: Boden-Plattformen, Flugzeug-Plattformen (einschließlich Ballon und Raketen) und Weltraumplattformen.

Diese drei Typen sollen sich grundsätzlich ergänzen, nicht untereinander konkurrieren.

— Bodenplattformen

Labor- und Feldmeßeinrichtungen zur Ermittlung der Ground-Truth.

Beobachtungsplattformen an Masten oder Türmen zu vergleichenden Messungen.

Transportable und feste Bodenstationen zur Messung der Atmosphäreinflüsse.

— Flugzeugplattformen (einschließlich Ballon und Rakete)

Für alle Anwendungen der Erdbeobachtung und Atmosphärenüberwachung.

Versuchsdurchführung für spätere Satellitenmissionen.

Für Boden- und Flugzeugmissionen können dem jeweiligen Bedarf entsprechend die günstigsten Wetterverhältnisse abgewartet werden. Die spektrale und geometrische Auflösung ist hoch, jedoch die Flugzeit und Befliegungsgebiet begrenzt.

— Weltraumplattformen (besonders Satelliten)

Die hauptsächlichsten Vorteile von Satellitenbeobachtungen gegenüber denen vom Flugzeug aus sind:

Große Synopsis erleichtert das Erkennen globaler Vorgänge und Zustände.

Beliebig hohe Wiederholraten von Messungen zur Beobachtung dynamischer Vorgänge.

Hohe Lebensdauer der Sensorplattform und Mission.

Die unterschiedliche Beleuchtung der Erde durch wechselnden Sonnenstand kann durch eine sonnensynchrone Umlaufbahn eliminiert werden.

Atmosphärische Einflüsse, Wolken und Regen, müssen hingenommen werden und sind schwerer zu korrigieren als bei Flugzeugeinsätzen.

2.1.4 Anwendung der Fernerkundung

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Anwendungsbereiche: Erdbeobachtung und Atmosphärenbeobachtung.

Im ersten Fall, der Erdbeobachtung, spielt die Atmosphäre eine die Messungen beeinflussende Rolle. Die Meßwerte müssen korrigiert werden oder können überhaupt nicht verwendet werden.

Im zweiten Fall, der Atmosphärenbeobachtung, sind gerade die die Erdbeobachtung störenden atmosphärischen Faktoren die mit der meisten Information über die Atmosphäre selbst.

Erdbeobachtungen werden daher grundsätzlich in spektralen Bereichen (atmosphärischen Fenstern) angestellt, in denen die störenden Einflüsse der Atmosphäre relativ gering und einfach korrigierbar sind.

Atmosphärenbeobachtungen stationärer und dynamischer Vorgänge werden in spektralen Bereichen hoher Absorption und damit Eigenstrahlung oder in Bereichen großer Streuung an Teilchen vorgenommen.

2.1.5 Atmosphärische Vorgänge

Die grundsätzlichen physikalischen Vorgänge, die die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen der für die Fernerkundung genutzter Frequenzen beeinflussen, sind:

- Absorption und Emission von Gasen
- Streuung und Absorption an Teilchen
- Brechung und unterschiedlicher Brechungsindex an Inhomogenitäten in Turbulenzen.

Durch die oben aufgeführten Prozesse wird die Sonnenstrahlung oder künstliche elektromagnetische Strahlung auf dem Weg zur Erdoberfläche in der Intensität und abhängig von der Wellenlänge verändert.

Auf alle von der Erdoberfläche reflektierte und emittierte Strahlung wird auf dem Weg zum Sensor wiederholt durch die gleichen Einflüsse eingewirkt.

Durch atmosphärische Vorgänge, wie Wind und Konvektion können darüberhinaus die Temperatur und die Temperaturgradienten des beobachteten Objekts entscheidend beeinflusst werden.

Absorption und Emission von Gasen

Hier liegt eine direkte Wechselwirkung zwischen der elektromagnetischen Welle und dem Gasatom oder Molekül vor. Das Atom oder Molekül entzieht der Strahlung direkt Energie, um seine innere Energie entsprechend zu erhöhen.

Es handelt sich hier um Resonanz-Effekte, die nur auf diskreten Frequenzen auftreten.

Gebiete relativ geringer Absorption werden als atmosphärische Fenster bezeichnet; die hauptsächlichsten Fenster sind:

- sichtbarer Bereich 0,4 — 0,75 μm
- ein schmaler Bereich im nahen Infrarot um 1 und 2 μm
- im mittleren Infrarot die Bereiche von 3 — 5 μm und 8 — 13 μm
- Mikrowellen- und Radiowellenbereich über 1 mm, ausgenommen einige Sauerstoff- und Wasserdampfabsorptionslinien.

Mit zunehmender Konzentration des störenden Gases steigt die Absorption. Die Abhängigkeit der Absorption von der Konzentration ist nicht linear, sondern eine komplexe Funktion von außerdem Druck und Temperatur.

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz sind die Wellenlängen höchster Absorption gleich denen höchster Emission:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$$

Das heißt, daß die Atmosphäre selbst Strahlung in den Bereichen emittiert, in der sie absorbiert.

Streuung und Absorption durch Teilchen

Wenn eine elektromagnetische Welle auf ein Teilchen trifft, wird ein Teil der Energie zurückgestrahlt, ein Teil gebrochen, gebeugt und durch Energieaufnahme des flüssigen oder festen Teilchens absorbiert.

Absorption in flüssigen oder festen Teilchen unterscheidet sich von der an Gasen durch höhere Absorption und breiterer spektraler Struktur.

Absorption und Streuung an Teilchen zeigt keine scharfen Absorptionsresonanzen, sondern breite mit der Frequenz sich ändernde Bänder.

Absorbierende Teilchen emittieren ihrerseits Strahlung und fügen so dem Spektralbild eine störende Komponente hinzu.

Brechung und unterschiedlicher Brechungsindex an Inhomogenitäten in Turbulenzen.

Die störenden Einflüsse der Brechung sind in der Regel gering. Für Sensoren hoher geometrischer Auflösung oder aktive Systeme, die Phasen-

vergleiche zwischen Sende- und Empfangssignal nutzen, sind Brechungseinflüsse jedoch erheblich.

2.1.6 Korrekturmöglichkeiten der gestörten Signale

Ein Teil der Störungseinflüsse ist nicht zu bestimmen und nicht vorherzusagen, ein Teil ist zufälliger Natur und kann mit statistischen Methoden beschrieben werden und ein Teil kann gut durch ein mathematisches Modell, gewonnen aus theoretischen und praktischen Versuchen, beschrieben werden.

Es gibt folgende mögliche Methoden der Datenkorrektur:

- Die Daten werden durch bekannte Parameter einer Standardatmosphäre korrigiert.
- Die veränderlichen atmosphärischen Daten werden mit zur Korrektur verwendet.
- Die Fernerkundungsdaten werden mit bekannten korrigierten Daten oder Ground-Truth-Daten verglichen. Die dabei entstehende Information über die Störungseffekte der Atmosphäre werden dann zur Korrektur unbekannter Fernerkundungsdaten verwendet.
- Bei multispektralen Analysen können Daten dadurch korrigiert werden, daß aus der unterschiedlichen Information der einzelnen Kanäle auf die Störeinflüsse rückgeschlossen werden kann.
- Bei unterschiedlichen Flughöhen kann aufgrund eines Vergleichs der Störung des Signals auf die Gesamtstöreinflüsse geschlossen werden.
- Verschiedene Techniken: z. B. kann der durch Beugungseffekte entstehende Fehler bei aktiven Höhenmessern durch Berücksichtigung des Brechungsindex der Standardatmosphäre hinreichend genau kompensiert werden.

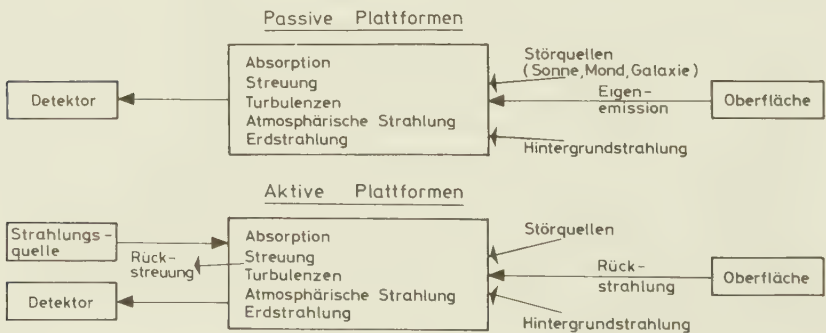


Abb. 1: Fernerkundungssensoren beeinflussende atmosphärische Prozesse

2.2 Grundlagen des LASER-Rückstreu-Meßverfahrens

2.2.1 Reflexion fester Materialien

Der Brechungsindex n und der Absorptionsindex κ , die zusammen den komplexen Brechungsindex $n' = n(1 - i\kappa)$ bilden, bestimmen eindeutig die optischen Eigenschaften fester Körper. Mit Hilfe der Fresnel'schen Formeln läßt sich der Fall der spiegelnden Reflexion so behandeln. Die Fresnel'schen Formeln gehen von den senkrecht und parallel zur Einfallsebene polarisierten Komponenten der elektromagnetischen Welle aus, die beide verschieden reflektiert werden. Es ergibt sich der unter dem Winkel θ reflektierte Energieanteil für beide Komponenten zu

Gleichung 1

$$r_{\parallel} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + \cos \theta_t} \right)^2 \quad \sin \theta = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i$$
$$r_{\perp} = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + \cos \theta_t} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \theta_i = \text{Einfallswinkel} \\ \theta_t = \text{Brechungswinkel} \end{array}$$

Der nicht reflektierte Anteil dringt in das Material ein und wird dort entsprechend dem Absorptionskoeffizienten $n\kappa$ geschwächt.

Für senkrechte Inzidenz gilt für das Reflexionsvermögen

Gleichung 2

$$r = \frac{n^2(1 + \kappa^2) + 1 - 2n}{n^2(1 + \kappa^2) + 1 + 2n}$$

Bei schrägem Einfall tritt entsprechend Gleichung 1 mit komplexen n noch eine Änderung der Phasenbeziehung zwischen der einfallenden und der ausfallenden Welle ein, dadurch wird die Polarisation verändert; linear polarisiertes Licht wird elliptisch polarisiert.

Bei großem $(n\kappa)$ tritt hohe Reflexion auf. Es dringt wenig Strahlung in das Material ein und damit wird wenig absorbiert. Ein großer Absorptionskoeffizient ist meist mit geringer Absorption verbunden und umgekehrt.

Die meisten natürlichen Oberflächenmaterialien liegen nun in kristalliner Form vor. Kristalle besitzen aufgrund ihrer Struktur Eigenschwin-

gungen. Im Bereich einer solchen Eigenschwingung ergibt sich eine sogenannte „anomale Dispersion“: der Brechungsindex sinkt zunächst ab und steigt dann steil auf einen sehr hohen Wert an um sofort wieder auf ein normales Niveau abzusinken. Gleichzeitig wächst auch der Absorptionskoeffizient auf einen sehr hohen Wert an, so daß sich an dieser Resonanzstelle im Spektrum metallähnliche Verhältnisse ergeben, die zu einer hohen Reflexion führen.

Die Baustoffe der Erdoberfläche liegen zumeist nicht in reiner Form vor und zumeist auch nicht als Körper mit ebenen Oberflächen, es müssen zusätzliche Parameter berücksichtigt werden. Besonders beachtenswert sind die Oberflächenstrukturen, speziell wenn die Unebenheiten der Oberfläche in die Größenordnung der Wellenlänge kommen. Hier wirkt jede Unebenheit als Streuzentrum und muß daher wie bei den Aerosolen der Atmosphäre mit Hilfe der Mie-Theorie (7) behandelt werden. Die spiegelnde Komponente der Reflexion wird auf den Gitterresonanzstellen der Minerale praktisch auf eine Streuung in den Halbraum reduziert.

2.2.2 Schwingungsverhalten von Kristallen (4)

Die Kristallgitter aller Minerale stellen ein System von elektrischen Oszillatoren dar. Die Gitterbausteine schwingen mit einer von Atomgewicht, Bindungskräften und Gitterstruktur abhängigen Frequenz. Diese Frequenz liegt im Infraroten entsprechend einer Wellenlänge von rund 10 bis 100 μm . In diesem Bereich absorbieren in der Tat alle Kristalle, sowohl metallische Leiter als auch Isolatoren.

Die Bereiche der stärksten Absorption der Kristalle im Infraroten erhält man durch Messungen der spektralen Absorption an sehr dünnen Schichten. Einfacher ist die sogenannte Reststrahlmethode.

Sie beruht darauf, daß in Gebieten hoher Absorption das Reflexionsvermögen groß ist. Läßt man die Strahlung einer kontinuierlichen Infrarot-Lichtquelle einige Male zwischen Kristallplatten hin und her reflektieren, so enthält der verbleibende Rest praktisch nur noch Wellen aus dem Spektralbereich der Reflexionsmaxima.

Bei roher Abschätzung kann ihre Wellenlänge gleich der der Absorptionsmaxima gesetzt werden.

Die Wellenlängen bzw. Frequenzen der Maxima der Infrarotabsorption, die nach der Reststrahlmethode erhalten wurden, sind für einige Alkalihalogenide in Tabelle 1 wiedergegeben.

	beobachtet				berechn. n. Gleichung 3
	u cm/s	D cm	μm	s^{-1}	s^{-1}
Na CL	$3,3 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	51,8	$5,8 \cdot 10^{12}$	$5,9 \cdot 10^{12}$
K CL	3,1	3,1	63,8	4,7	4,9
K Br	2,3	3,3	83,3	3,6	3,5
K J	1,9	3,5	111	2,7	2,8

(Aus Pohl, R. W.: Optik und Atomphysik 1963) (26) Tab. 1

Wie man sieht, rücken mit zunehmender Masse der Ionen die Schwingungen nach größeren Wellenlängen.

Da natürliche Oberflächen die Begrenzung von dreidimensional ausgedehnten Kristallen darstellen, bilden sich nicht nur Schwingungen einer einzigen Frequenz aus. Es gibt eine ganze Anzahl möglicher Gitterschwingungen.

Im stationären Fall bilden sich im Kristall stehende Wellen aus, wobei wie bei jeder stehenden Welle an der Begrenzung des Systems Schwingungsknoten liegen.

Die höchstmögliche Frequenz wird bestimmt durch den Abstand D zweier Gitterpunkte. Denkt man sich z. B. einen fadenförmigen Kristall aus Na^+ - und CL^- -Ionen immer weiter verkürzt, so wäre nur noch eine Schwingung der Wellenlänge $\lambda_{\min} = 2 D$ möglich.

Die höchstmögliche Frequenz in einem Na CL-Kristall wäre also nach diesem einfachen Bild

$$\nu = \frac{u}{2D} = \frac{1}{2} u N^{1/3} \quad \text{Gleich. 3}$$

wenn N die Gesamtzahl der Gitterpunkte in cm^3 (Na^+ - und CL^- -Ionen) bedeutet. Diese mechanische Schwingung, die sich im Kristall mit der Schallgeschwindigkeit u fortpflanzt, tritt nun mit elektromagnetischen Wellen in Wechselwirkung, da mit den Gitterbausteinen die elektrischen Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens der beiden Ionenarten schwingen.

Entsprechend der großen Wechselwirkung tritt bei diesen eine starke Reflexion der elektromagnetischen Welle auf. In Tabelle 1 ist zu sehen, wie gut die berechneten Werte mit den experimentell ermittelten Werten übereinstimmen.

Bei den betrachteten Gitterschwingungen handelt es sich um die Schwingungen der einzelnen Gitterbausteine gegeneinander. Bei Gitterbausteinen, die aus mehreren Atomen zusammengesetzt sind (z. B. Karbonate CaCO_3 ; FeCO_3 ; MgCO_3 ; BaCO_3) sind auch sogenannte innere Schwingungen innerhalb dieser Gruppe möglich, wobei die Bindung an das Gitter mehr oder weniger starke Störungen hervorrufen kann. Diese inneren Schwingungen sind etwas kurzwelliger als die der Gitterbausteine gegeneinander.

Die Analyse des Reflexionsspektrums natürlicher Oberflächen läßt Schlüsse auf die Zusammensetzung des Materials zu und erlaubt damit seine Identifikation.

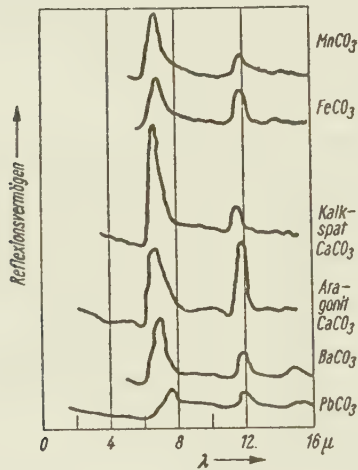


Abb. 2: Reflexion der Karbonate im infraroten Wellenlängenbereich.
(Aus P. Schulz: Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern) (28)

Reflexionsmessungen im infraroten Spektralbereich hatten früher erheblich größere Bedeutung als heute zur Gewinnung von Erkenntnissen über den inneren Aufbau der Materie und zur Erlangung bestimmter charakteristischer Stoffkonstanten. Heute werden fast ausschließlich Transmissionsmessungen, die wesentlich einfacher auszuwerten sind, durchgeführt. Viele Ergebnisse der Reflexionsspektroskopie sind Allgemeingut der Physik geworden (wie z. B. die Reststrahlenmethoden).

Reflexionsmessungen sind zwar nicht so präzise wie Absorptionsmessungen, jedoch dort, wo die Präparation der Proben schwierig ist und ganz besonders in dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Fernmeßverfahren, gegenüber anderen Methoden von großem Wert und Aussagekraft.

2.2.3 Einfluß der Streureflexion

Streureflexion tritt immer dann auf, wenn Strahlung auf einen Körper fällt, dessen Oberfläche nicht einheitlich glatt und von — gegenüber der Wellenlänge — sehr großer Ausdehnung, sondern rau und sozusagen in eine große Anzahl von Elementarflächen aufgeteilt ist. Der einzelne Elementarakt der Reflexion an einem Oberflächenkorn befolgt das Reflexionsgesetz; da aber die reflektierenden Flächen in ihrer räumlichen Orientierung im allgemeinen statistisch verteilt sein werden, tritt nicht mehr eine Reflexion in eine bestimmte Richtung auf, sondern in alle möglichen Richtungen. Dabei können in der Streureflexion bestimmte Reflexionserscheinungen durchaus bevorzugt sein, etwa in Richtung der einfallenden Strahlung (Vorwärtsstreuung) oder dagegen (Rückwärtsstreuung) oder unter bestimmten Winkeln dazu.

Die Richtungsabhängigkeit der Streustrahlung ist für diese Betrachtung uninteressant, wichtig ist hier nur die Intensität, das diffuse Reflexionsvermögen, das je nach den Randbedingungen auf den ganzen Raum, den Halbraum oder auch nur einen bestimmten herausgegriffenen Raumwinkel bezogen sein kann.

Betrachtet man beispielhaft zunächst die Streuung durch absorptionsfreie Teilchen unter folgenden Randbedingungen

- die streuenden Teilchen haben Kugelgestalt
- der Durchmesser ist sehr klein gegen die Wellenlänge
- ihr Durchmesser ist klein gegen den mittleren gegenseitigen Abstand
- die Anordnung der Teilchen ist völlig ungeordnet

wird die einfallende (gerichtete) Strahlung der Stärke J_0 nach Durchlaufen einer Strecke d auf den Betrag $J = J_0 \cdot e^{-\alpha^* d}$ geschwächt.

Dieses Gesetz entspricht dem LAMBERT-BOUGUERschen Absorptionsgesetz. Die Intensitätsverluste werden aber nicht durch Absorption sondern durch Streuung hervorgerufen. Die Größe α^* wird somit als Streukonstante bezeichnet. RAYLEIGH hat gefunden, daß für Stoffe unter u. a. Bedingungen

$$\alpha^* \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad \text{ist.}$$

Für Teilchen, deren Durchmesser sehr groß gegen die Strahlungswellenlänge ist, gilt gleiches: es erweist sich nämlich, daß α^* unabhängig von der Wellenlänge gleich der Summe der Querschnitte der streuenden Teilchen (Radius r)

$$\alpha^* \sim \sum r_i^2 \quad \text{ist.}$$

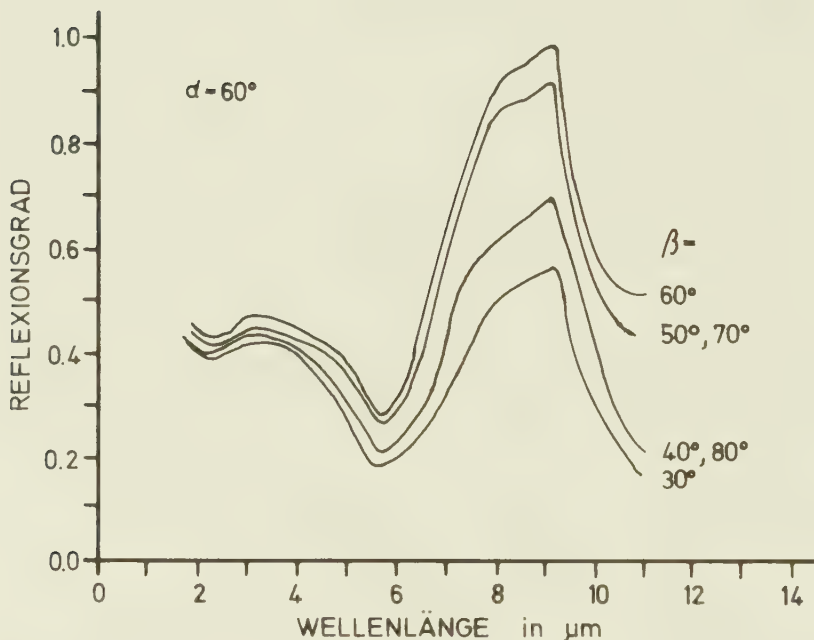


Abb. 3: Abhängigkeit des Reflexionsgrades vom Auftreffwinkel bei Quarzsand

(Aus „Untersuchung des Nutzens der Fernerkundung der Erde“, Studie der Firma MBB im Auftrag der GfW 1973)

Die wesentlichen die Rückstreuung störenden Einflüsse sind die Oberflächenrauigkeit und der Einfallswinkel. Aus Abb. 3 wird deutlich, daß der Einfallswinkel keinen Einfluß auf die spektrale Lage der Maxima der Rückstreuung hat, sondern nur auf die Höhe, die Intensität. Da der Einfallswinkel beim hier vorgeschlagenen flugzeuggetragenen Meßsystem (Kap. 4) konstant bleibt und auch die durch die Änderung der Topogra-

phie bedingte Winkeländerung sich durch die systembedingte Aufsummierung und Mittelwertbildung über die Zeit ausmittelt ist der Einfluß ohne Bedeutung.

Im Rahmen der Untersuchungen der spektralen Emission des Mondes zur Gesteinsanalyse wurde gefunden (18), daß die Struktur (Korngröße und Oberflächenrauigkeit) des rückstreuenden Materials von erheblichem Einfluß wird, wenn sie in den Bereich der Wellenlänge der zur Untersuchung benutzten Strahlung rückt. Die Untersuchungen von Logan (17) zeigen, daß eine erhebliche nach Mineralen unterschiedliche Verschiebung der Rückstreumaxima bei Korngrößen um 10 μm auftritt.

Geht man jedoch von der Erde und den hier natürlich vorkommenden Oberflächenstrukturen aus, so zeigt sich, daß der weitaus größte Anteil der Strukturen und Korngrößen außerhalb des Wellenlängenbereiches liegt (Abb.: 4,5). Ein noch verbleibender Einfluß durch Strukturen im 10 μm -Bereich mittelt sich analog zu den unterschiedlichen Einfallswinkeln bis zur Bedeutungslosigkeit aus. Im Rahmen einer Flugzeugerprobung* am 15. Oktober 1979 wurde experimentell ermittelt, daß der Gesamtfehler, einschließlich der Apparatefehler, bei natürlich rauen Oberflächen (Vegetation, gepflügte Äcker) kleiner als 3 % ist.

* Flugzerprobung im Rahmen des Entwicklungsvertrages:
01 QS 078 - AK/WF/WE 0275-2.1 der Bundesrepublik Deutschland mit dem Battelle-Institut, Frankfurt.
Durchführung bei der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V.

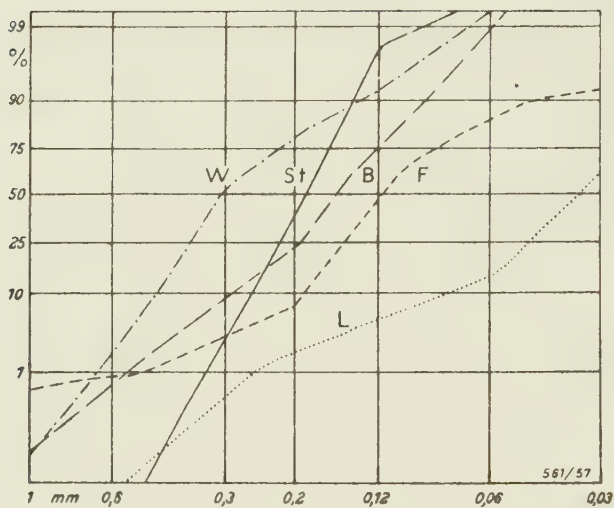


Abb. 4: Kornkurven im Wahrscheinlichkeitsnetz aus dem äolischen Bereich

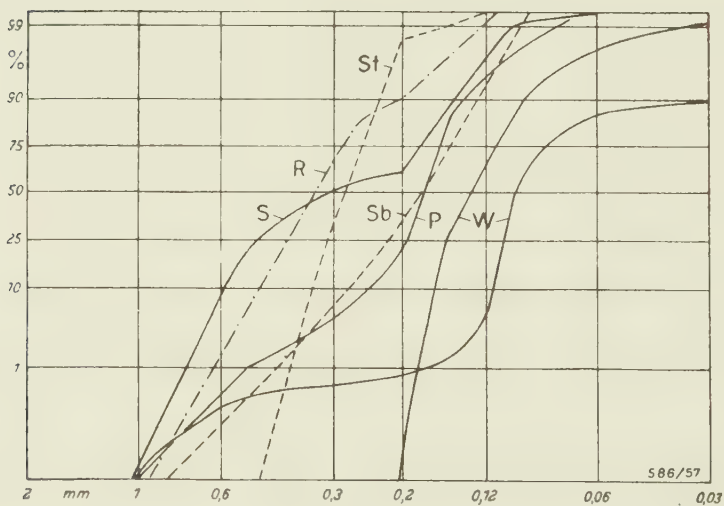


Abb. 5: Kornkurven im Wahrscheinlichkeitsnetz aus dem litoralen Bereich

(Abb. 4 und 5 aus A. Bentz, Lehrbuch der Angewandten Geologie)

2.2.4 Wirkungsweise abstimmbarer Kohlendioxid-LASER

Zur Durchführung infrarotspektroskopischer Untersuchungen im $10\text{ }\mu\text{m}$ Bereich höchster spektraler Auflösung bietet sich der CO_2 -Molekül-LASER an.

Einmal liegt die typische Emissionswellenlänge im vorgegebenen Bereich und ferner hat der CO_2 -LASER gegenüber anderen Lasern die Vorteile:

Große Ausgangsleistung
Guter Wirkungsgrad
Hoher Entwicklungsstand.

Beim CO_2 -LASER ist im Gegensatz zu He-Ne-Lasern und Argon-Lasern ein Molekülgas, eben das CO_2 , das aktive Medium. Die Wellenlänge der emittierten Strahlung liegt im Infraroten bei $10\text{ }\mu\text{m}$.

Zur Erhöhung des Wirkungsgrades betreibt man den Laser nicht mit reinem CO_2 , sondern setzt zusätzlich Stickstoff, Helium und eventuell Wasser in den Gasraum zu. Die Anregungsenergie überträgt sich bei Stößen auf das Kohlendioxid.

Bei einem Gasgemisch von $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 2 : 10$ erreicht man Wirkungsgrade von 15 bis 20 %. Im Labor wurde schon ein Wirkungsgrad von 33 % erzielt.

In Abb. 6 sind die zum Verständnis des Laserprozesses nötigen Anregungszustände des Kohlendioxid-Moleküls zu sehen.

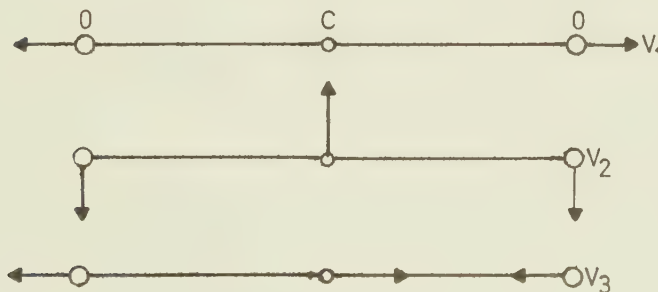


Abb. 6: Die Fundamentalschwingungen des CO_2 -Moleküls: Symmetrische Streck- oder Valenzschwingung, Knickschwingung, unsymmetrische Streckschwingung (von oben nach unten).

Es handelt sich um die symmetrische Streck- oder Valenzschwingung, die Knickschwingung, sowie die unsymmetrische Streckschwingung. Jeden Schwingungszustand kann man daher durch ein Zahlentripel kennzeichnen, das angibt, wievielfach die einzelnen Fundamentalschwingungen gleichzeitig angeregt sind.

(001) bedeutet beispielsweise, daß nur die unsymmetrische Streckschwingung einfach angeregt ist.

Diese Schwingungsniveaus sind nun noch in eine Reihe Rotations-Schwingungs-Terme aufgespalten.

Mit zunehmender Anregung der Rotationsterme wächst die Rotationsquantenzahl J . Nach der Quantentheorie darf sich bei Übergängen die Rotationsquantenzahl nur um den Betrag 1 ändern, d. h. $\Delta J = \pm 1$.

Die $\Delta J = +1$ entsprechenden Linien heißen R-Zweig, die Linien mit $\Delta J = -1$ P-Zweig.

Bringt man nun in den Strahlengang ein dispergierendes Element wie Prismen oder Gitter, so kann man den Laser dazu zwingen, nur auf einer Linie zu schwingen.

Verändert man die Stellung der Prismen, kann man den Laser nacheinander auf ca. 120 Linien im Bereich zwischen 9,1 und 11,9 μm schwingen lassen. Wenn man verschiedene Isotope von Sauerstoff und Stickstoff verwendet, kann man bis zu 500 Linien zwischen 9,1 und 11,9 μm erzeugen.

2.2.5 LASER-Reflexionsspektroskopie — Ein neues Verfahren zur Fernerkundung der Erde

Die im Kapitel 2.2 beschriebenen physikalischen und mineralogischen Grundlagen sind die wesentlichen Randbedingungen für das vom Autor entwickelte Verfahren zur Fernanalyse der Erdoberfläche. Nur das Zusammentreffen mehrerer physikalisch-mineralogischer Effekte ermöglicht die Funktion.

So sind die mineralspezifischen Rückstreuereigenschaften der Silikate besonders signifikant in einem Bereich hoher Transparenz der Atmosphäre. Zufällig arbeiten die Kohlendioxid-LASER, die sich durch hohen Entwicklungsstand und hohe Strahlungsleistung auszeichnen im gleichen Wellenlängenbereich. Fehler, die durch Interferenz mit feinen Oberflächenrauigkeiten im Wellenlängenbereich auftreten sind bei natürlichen Oberflächen der Erde zu vernachlässigen.

Die genannten Tatsachen führten zu der Überlegung der Rückstreuemesungen von CO₂-LASER-Strahlung zur Fernanalyse der Stoffe der Erdoberfläche, deren experimentelle Erprobung in den folgenden Kapiteln beschrieben ist.

3. Entwicklung einer LASER-Spektrometeranlage und Laboruntersuchungen

Im Rahmen der Arbeit wurde mit einem vom Battelle-Institut, Frankfurt, zur Verfügung gestellten, abstimmbaren CO₂-LASER (Abb. 7) und optischen und elektronischen Bauelementen des Institutes für Physik der Atmosphäre der DFVLR im Hause der DFVLR Oberpfaffenhofen vom Verfasser ein Meßstand zur vergleichenden LASER-Reflexionsspektroskopie entwickelt und aufgebaut. Labormäßig wurden systematische Reihenuntersuchungen bei unterschiedlichen Versuchsparametern durchgeführt.

3.1 Versuchsanordnung

Um die Methode der vergleichenden Laserreflexionsmessung in den Griff zu bekommen und auch um mit der Technologie des Lasers und der IR-Optik vertraut zu werden, wurden labormäßig Untersuchungen an einigen für die Erdoberfläche repräsentativen Proben durchgeführt, wobei für die gleichen Proben unterschiedliche Versuchsparameter eingestellt wurden.

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abb. 5 dargestellt. Der Laserstrahl des abstimmbaren CO₂-Lasers passiert eine Irisblende zur Anpassung der absoluten Strahlungsleistung, in dem folgenden Strahlteiler wird ein Teil der Strahlung abgezweigt und einem Leistungsmesser zur Kontrolle der Sendeleistung zugeführt und registriert. Der Hauptstrahl passiert einen Strahlaufweiter und trifft auf die zu untersuchende Probe. Da der bestrahlte Teil der Probe im Gesichtsfeld eines Strahlungsempfängers liegt, wird ein Teil der rückgestreuten Strahlung dort in eine elektrische Spannung umgewandelt und gleichfalls registriert.

3.2 Versuchsdurchführung:

Die Abstimmung des Lasers erfolgte mit einem Synchronmotor, der den Wellenlängenbereich von 9.1 bis 10.9 μm in ca. 10 min. durchfuhr, wobei ca. 100 LASER-Emissionslinien angeschwungen sind.

Um eine spektrale Beeinflussung durch die Optik und Detektoren zu vermeiden, wurden die Reflexionsmeßwerte der Probe relativ zu den Meßwerten an einem rauen Aluminiumreflektor an der Stelle der Probe gewertet.

Schwerpunkt der Untersuchungen lag bei der Messung von Mineralien und Gesteinen. Um ein Gefühl für die Machbarkeit des Verfahrens zu bekommen, wurden jedoch auch Bodenproben, Vegetationsproben und Wasser unterschiedlicher Salinität und mit und ohne Ölfilm gemessen.

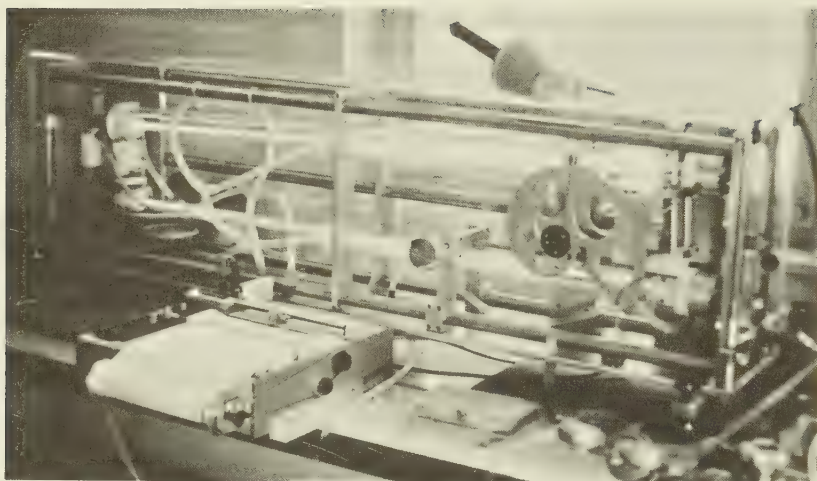


Abb. 7: Abstimmbarer CO₂-LASER* in gefalteter Ausführung

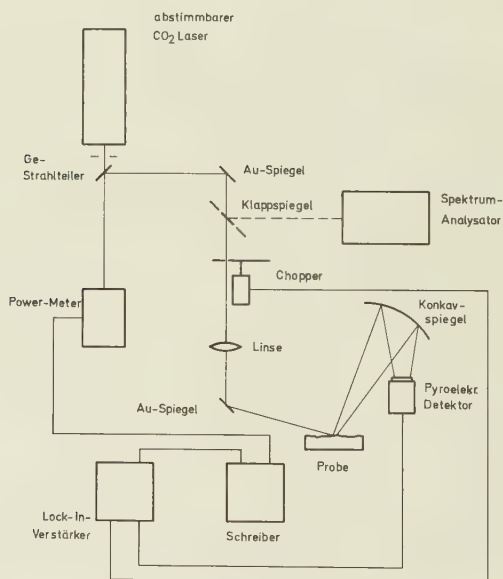


Abb. 8: Anordnung zur Messung von Reflexionsspektren mit dem abstimmbaren CO₂-LASER

* Der abgebildete LASER ist ein Experimentalmittel des Batelle Inst., Frankfurt. Der LASER wurde für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

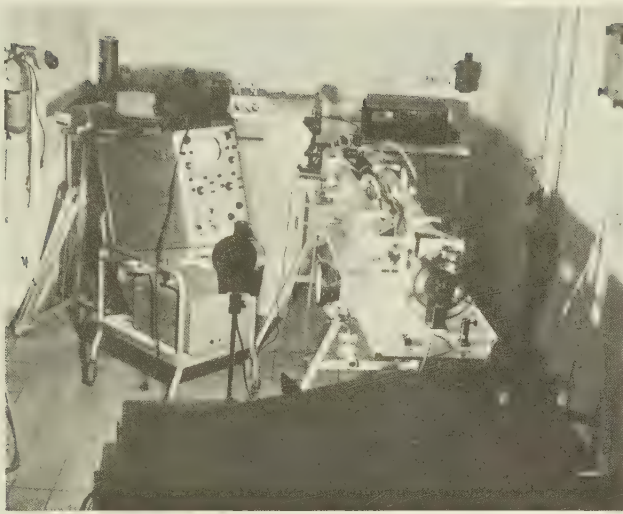


Abb. 9: LASER-Spektroskopische Laboreinrichtung



Abb. 10: Laboraufbau zur vergleichenden LASER-Spektroskopie an verschiedenen Bodenarten

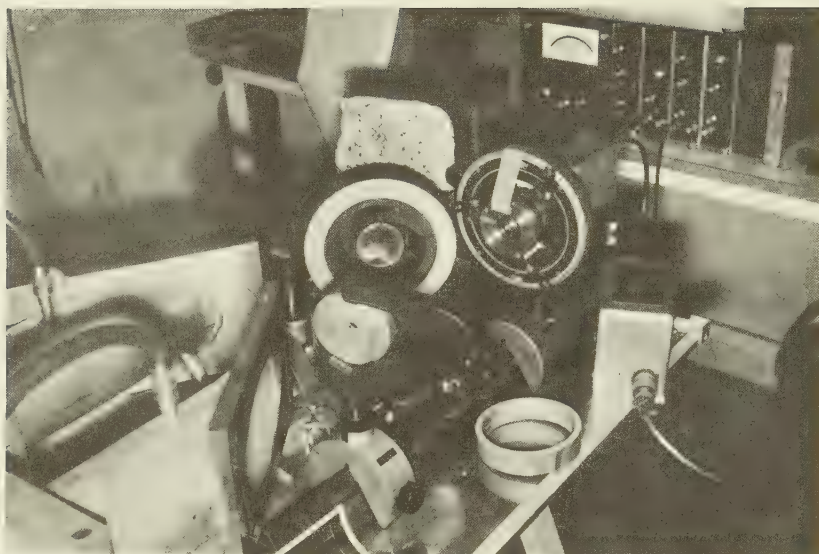


Abb. 11: Laboraufbau für LASER-Spektroskopie an Gesteinen

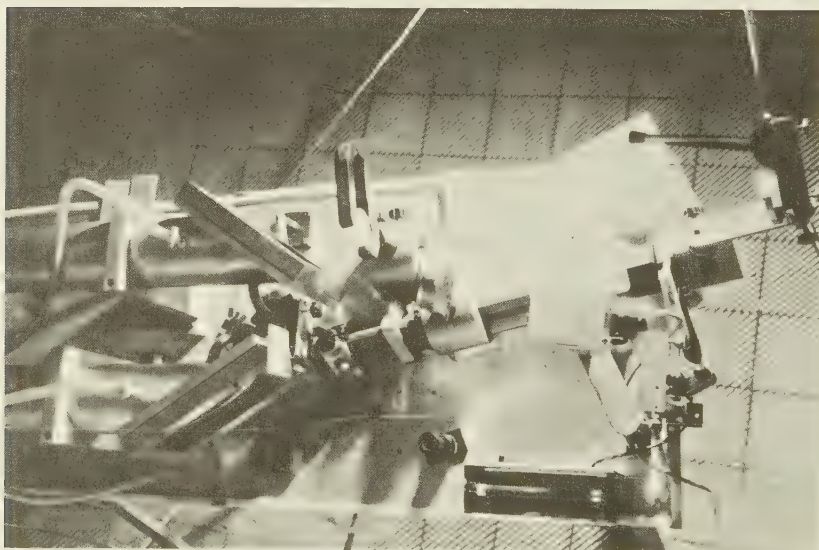


Abb. 12: Laboraufbau für LASER-Spektroskopie an Vegetationsproben

3.3 Ergebnisse und Diskussion der Laboruntersuchungen

3.3.1 Allgemeines

In systematischen Reihenuntersuchungen wurden

- 27 Einzelminerale
- 14 unterschiedliche Gesteinstypen
- 6 verschiedene Bodenarten
- 2 verschiedene Vegetationsproben
- div. Messungen an Wasseroberflächen

durchgeführt.

Es wurden insgesamt über 200 Reflexionsspektren unter Variation der Parameter

- Einfallswinkel
- Oberflächenbeschaffenheit
- Feuchte
- Temperatur

vom Verfasser aufgenommen.

Es hat sich erwiesen, daß die Methode der Infrarot-LASER-Reflexions-spektroskopie in gewissem Sinne der Röntgenbeugungsmethode ähnlich und teilweise sogar überlegen ist. Die Spektren sind einfach zu interpretieren und die Reflexionsmaxima sind diagnostisch. Kaolin kann zum Beispiel im Röntgenspektrum über einen weiten Bereich Maxima erzeugen und in der Intensität variieren, das IR-Rückstreuungsspektrum war jedoch immer ähnlich und die Maxima an den gleichen spektralen Stellen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß bereits mit zwei ausgewählten Frequenzen eine eindeutige Identifikation von vielen Stoffen qualitativ und quantitativ möglich ist.

Eine Änderung der Parameter: Feuchte, Temperatur, Korngröße und Strahlungsauffreffwinkel haben die Spektren in ihrer Interpretierbarkeit nicht wesentlich beeinträchtigt. Der Einfluß der Feuchte macht sich jedoch als Zusatzinformation im Spektrum bemerkbar. (Abb. 13, 38, 39)

Prinzipiell hat sich gezeigt, daß alle Möglichkeiten der klassischen IR-Spektroskopie auf die LASER-IR-Spektroskopie übertragbar sind und sogar durch die speziellen LASER-Eigenschaften oft wesentlich bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Aus der Vielzahl der durchgeführten Messungen seien einige beispielhafte Ergebnisse diskutiert.

Die Reflexionsmessungen wurden im Emissionsbereich des CO₂-Lasers zwischen 9.2 und 10.8 μm durchgeführt.

Wie aus den abgebildeten Reflexionsspektren ersichtlich ist, schwanken in diesem Bereich die spektralen Reflektivitäten zwischen 90 % und 5 %. Die gewählten unterschiedlichen Versuchsparmeter beeinflussten, bedingt durch die rauen Oberflächen und der dadurch quasi-statistischen Verteilung der Kristallorientierungen der Einzelkörner, bis auf eine Änderung der Gesamreflektivität aufgrund der gerichteten Streuung, die Kurvenform nicht meßbar.

Im Rahmen der Arbeit wurden mit Hilfe von CO₂-LASER-Spektroskopie folgende Minerale untersucht:

Mineral	Rückstreumaxima in μm			Herkunft/ Lokalität
Forsterit	10,17	10,84		Min.Inst.Uni Köln
Fayalit	10,84			Min.Inst.Uni Köln
Epidot	9,64	10,53		Kobos, SWAfrika
Beryll	9,85			Spitzkoppe, SWA
Bronzit	10,24	10,8		SWAfrika
Gr. Hornblende	10,2			Khomasgeb.SWA
Albit	9,72	10,24		Geol. Inst. Köln
Anorthit	10,76			Geol. Inst. Köln
Fe-Mikroklin	10,84			Spitzkoppe, SWA
Fe-Sanidin	10,06			Min.Inst.Uni Köln
Kalzit	keine Signifikanz			SWAfrika
Gips	9,96			Südharz
Baryt	9,23	10,15		Monreal, Eifel
Hämatit	(9,6) wenig signifikant			Geol. Inst. Köln
Hydrargillit	9,75	10,2	10,85	Geol. Survey SA
Kaolinit	9,5	10,5		Schnaittenbach
Dickit	9,05	9,5	10,5	Min.Inst.Uni Köln
Halloysit	9,5	10,5	10,6	Min.Inst.Uni Köln
Cryostil	9,2	9,75	10,35	Min.Inst.Uni Köln
Montmorillonit	9,2 bis 9,8			Kenia
Glaukonit	9,3	10,0		Geol. Inst. Köln
Vermiculit	9,8			synthetisch
Phlogopit	9,8			synthetisch
Biotit	9,8			Spitzkoppe, SWA
Muskovit	9,6	10,8		Spitzkoppe, SWA
Talk	9,8			Omitara, SWA
Chlorit	9,4	10,1		Kobos, SWAfrika

Tabelle 2

Im Rahmen der Arbeit wurden mit Hilfe von CO₂-LASER-Spektroskopie folgende Gesteinsproben untersucht:

Gestein	Rückstreumaxima in μm			Herkunft/ Lokalität
Quarz-Diorit	9,2	9,5	10,2	Schweinheim, Spessart
Diorit	10,2	10,4		Schweinheim, Spessart
Granit	9,2	10,4		Brocken, Harz
Syenit	9,2	9,9		Plauen (Grund)
Gabbro	9,5	9,9		Odenwald
Labradorit	9,9			Norwegen
Trachyt	9,8			Siebengebirge
Hornbl.-Andesit	9,7	10,8		SWAfrika, Kobos
Hornfels	9,6	10,4	10,7	SWAfrika, Kobos
Ignimbrit	9,2			Hoggar-Gebirge (Algerien)
Basalt	9,8	10,8		Laacher-See
Tonstein	9,65			Geol. Inst. Köln
Wüstenlack	9,2	9,8		In Ecker (Algerien)
Roter Sahara Sand	9,2	10,2	10,6	In Ecker (Algerien)

Von folgenden Gesteinen wurden Dünnschliffe angefertigt und die prozentuale Zusammensetzung ermittelt:

1.) <i>Quarz-Diorit</i>		2.) <i>Granit (roter Granit)</i>	
Quarz	30 %	Quarz	35 %
Plagioklas	40 %	K-Feldspat	45 %
Biotit	10 %	Plagioklas	15 %
Hornblende	19 %	Biotit (grün)	5 %
Epidot	1 %		
3.) <i>Syenit (Monzonit)</i>		4.) <i>Gabbro (Olivingabbro)</i>	
Quarz	11 %	Plagioklas	79 %
K-Feldspäte	48 %	Pyroxen	11 %
Plagioklas	25 %	Olivin	9 %
Hornblende	14 %	Pyrit	1 %
Apatit, Titanit, Erz	2 %		

Tabelle 3

3.3.2 Laserrückstreuemessungen an ausgewählten Mineralen

Die Messungen zeigten im einzelnen:

- Karbonate

Im Bereich des Emissionsspektrums des CO₂-Lasers zwischen 9 und 11 μm zeigten die Karbonate keine ausgeprägten Reflexionsbanden. Nach Moenke (22) liegen die Resonanzlinien bei 7,1 μm und bei 11,4 μm bis 11,6 μm , bei einigen Karbonaten auch 13,5 μm . Prinzipiell ist es denkbar auch in diesen Bereichen mit einem speziell entwickelten Laser Messungen durchzuführen, im Rahmen dieser Untersuchungen mußten jedoch die Karbonate unberücksichtigt bleiben.

- Sulphate

Die Fundamental-Schwingungen des SO₄⁻²-Ions, die bei 9,05 μm und 10,19 μm liegen, lassen dagegen für einige Sulphate eine Identifikation zu. Gips besitzt Reflexionsbanden bei 9,96 μm , Baryt bei 9,23 μm und bei 10,15 μm .

- Nitrate

Nach Moenke (24) liegen die Resonanzbanden der Nitrat-Mineralen bei 7,96 μm bis 7,14 μm . Ammonium-Nitrat kann aufgrund der starken N-H-Valenz-Schwingung bei 3,19 μm bis 3,31 μm differenziert werden. Zwischen 9 und 11 μm sind jedoch keine Resonanzstellen zu erwarten, das vorgeschlagene Verfahren mit CO₂-Laserrückstreuung ist nicht anwendbar.

- Halogenide

Die in der Natur vorkommenden Salze wie Halit, Sylvit und Fluorit sind für infrarote Strahlung weitgehend transparent. Viele infrarot-optische Bauteile werden aus den genannten Salzen hergestellt. Die Linsen und Prismen des im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Laserreflexionsspektrometers waren ebenfalls aus Fluorit und Halit. Eine Ausnahme stellt Ammonium-Chlorit dar, das NH₄⁺-Ion bewirkt Resonanzstellen bei 7,09 μm und 3,22 μm .

- Oxide

Magnetit, Gahnit, Franklinit, Chromit und der Mg-Al-Spinell unterscheiden sich zwischen 12,5 μm und 31,25 μm . Hämatit zeigt spektrale Peaks bei 5,20 μm .

Die Titanate unterscheiden sich zwischen 20 μm und 13 μm . Auch die Reflexionsmaxima von Spinell, Magnetit, Hämatit, Anatas, Brookit, Ilmenit liegen sämtlich außerhalb des spektralen Umfanges des CO₂-Lasers von 9—12 μm und scheiden für das vorgeschlagene Verfahren aus.

- Silikate

- Nesosilikate

Die Reflexionsbanden der Olivine sind abhängig von der

Kationen-Substitution, jedoch ist eine Verwandtschaft aller Olivine aus dem IR-Spektrum erkennbar.

Forsterit (Mg_2SiO_4) z. B. reflektiert das Laserlicht bei $10,17\text{ }\mu\text{m}$ und $10,84\text{ }\mu\text{m}$, Fayalit (Fe_2SiO_4) dagegen nur bei $10,84\text{ }\mu\text{m}$.

- **Sorosilikate**

Daß die Gruppe der Sorosilikate strukturell wesentlich komplizierter ist, läßt sich im IR-Spektrum deutlich erkennen. Lawsonit ($\text{CaAl}_2(\text{OH})_2[\text{Si}_2\text{O}_7]\cdot\text{H}_2\text{O}$) besitzt sechs untereinander abhängige Al-O und $(\text{OH})^-$ -Gruppen, die durch Si_2O_7 Gruppen verbunden sind. Die spektralen Maxima im CO_2 -Laserlicht liegen bei $10,05\text{ }\mu\text{m}$ und $10,58\text{ }\mu\text{m}$. Nach Moenke liegen weitere Banden bei $11,36\text{ }\mu\text{m}$ und $17,24$ bis $20,83\text{ }\mu\text{m}$.

- **Cyclosilikate**

Die Minerale der Beryll-Gruppe haben deutliche, kontrastreiche Spektren, sind sich dabei aber sehr ähnlich. Unterschiedliche Zusammensetzungen prägen sich deutlich im Bereich $9,45\text{ }\mu\text{m}$ bis $9,85\text{ }\mu\text{m}$ aus.

- **Inosilikate**

Die Ortho- als auch Clinopyroxene absorbieren, respektive reflektieren maximal im Bereich $9\text{ }\mu\text{m}$, also genau im Wellenlängenbereich des CO_2 -Lasers.

Abhängigkeit vom Mg-Fe-Verhältnis drückt sich deutlich durch die Lage der Maxima aus.

Die chemisch sehr verwandten Amphibole sind den Pyroxenen auch im Infrarotspektrum entsprechend ähnlich.

- **Phyllosilikate**

Die meisten Glimmer haben starke diagnostische Absorptionsbanden ebenfalls im Emissionsbereich des CO_2 -Lasers, also zwischen $9\text{ }\mu\text{m}$ und $11\text{ }\mu\text{m}$. Die Messungen werden detaillierter unter 3.3.3 diskutiert.

- **Tektosilikate**

Nach Saksena (27) wird das optische Verhalten von SiO_2 bestimmt durch:

Si-O-Translation im Bereich $9,10$ bis $12,5\text{ }\mu\text{m}$

Si-Si-Translation im Bereich $12,5$ bis $16,67\text{ }\mu\text{m}$

Si-O-Si-Torsion im Bereich $21,74$ bis $23,30\text{ }\mu\text{m}$

Der erste Bereich von $9,10\text{ }\mu\text{m}$ bis $12,5\text{ }\mu\text{m}$ ist für das CO_2 -Laserrückstreuverfahren geeignet. Es läßt sich in diesem Bereich eine Differenzierung der Plagioklase und Orthoklase durchführen. Albit z. B. hat zwei spektrale Banden bei $9,72\text{ }\mu\text{m}$ und $10,24\text{ }\mu\text{m}$, Anorthit eine sehr ausgeprägte Bande bei $10,76\text{ }\mu\text{m}$. Alle dazwischen liegenden Mischkristalle zeigen unterschiedliche Lagen ihrer Maxima.

Fe-Mikroklin ($K Fe Si_3 O_8$) hat ein Reflexionsmaximum bei 10,84 μm , Sanidin bei 10,06 μm .

3.3.3 Untersuchungen an Böden

3.3.3.1 Spezielle Untersuchungen an Bodenkolloiden

Die Messungen an Bodenkolloiden wurden mit der gleichen Laserapparatur vorgenommen wie die an Gesteinshandstücken. Die Proben wurden vor der Messung 24 h bei 110° C getrocknet.

Die bereits an grobkristallinen Quarzhandstücken gemessenen Reflexionsbanden bei 9,1 μm konnten auch an feinem Quarzsand bestätigt werden.

Rückstreumessungen an Hydrargillit brachten Maxima bei 9,75 μm bei 10,2 μm und bei 10,85 μm .

Hämatit (Fe_2O_3) reflektiert bei 9,6 μm nicht diagnostisch schwach. Ein Vergleich der Zweischichttonminerale wie Kaolinit, Dickit und Halloysit zeigt große Ähnlichkeit, stets treten Maxima bei 9,5 und 10,5 μm auf.

Dickit unterscheidet sich vom Kaolinit durch ein weiteres Maximum bei 9,05 μm .

Halloysit dagegen besitzt eine weniger ausgeprägte Bande bei 10,6 μm .

Cryostil unterscheidet sich von den oben erwähnten Tönen durch die Oktaederschicht, die nicht aus einer Hydrargillit, sondern einer Brucit-schicht ($Mg(OH)_2$) besteht. Aufgrund der weniger starken Bindung der Tetraeder an die Oktaeder der vorgenannten Minerale ist die erste Bande auf 9,2 μm verschoben. Weiterhin treten Banden bei 9,75 μm und 10,35 μm auf.

Die Messungen an Montmorillonit konnten die Literaturwerte des Standardmontmorillonit vom Mississippi nicht ganz bestätigen. Durch den isomorphen Einsatz der Kationen im Kristallgitter scheint hier eine gewisse Unsicherheit vorzuliegen. Die Reflexionsbanden liegen jedoch stets zwischen 9,2 μm und 9,8 μm .

Glaukonit sowohl maritimer Herkunft als auch als Umwandlungsmineral von Biotit zeigt Banden bei 9,3 μm und 10,0 μm .

Weniger charakteristisch sind die Reflexionsbanden von Vermiculit, ein stark wasserhaltiges Zersetzungsprodukt von u. a. Biotit. Vermiculit hat keine einheitliche chemische Zusammensetzung jedoch stets mehr oder weniger starke Banden bei 9,8 μm .

Biotit und Phlogopit zeigen ähnliche Spektren.

Muskovit zeigt neben der Bande bei 9,6 μm eine weitere Bande bei 10,8 μm .

Talk als weiteres Dreischichtmineral (Tetraeder-, Oktaeder-, Tetraederschicht) zeigt ebenfalls eine starke Bande bei 9,8 μm .

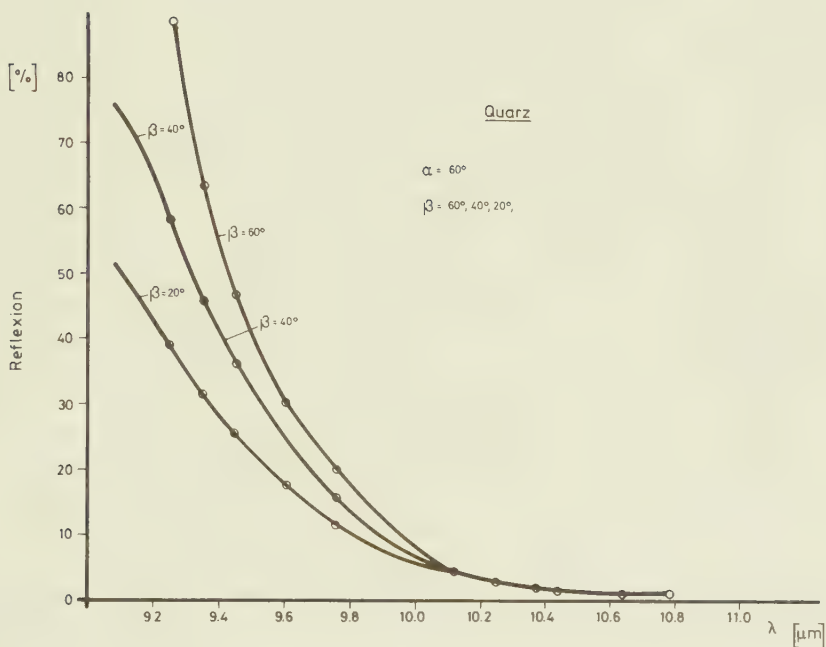


Abb. 13: Reflexionsspektrum eines großkristallinen Handstückes Quarz aus einem Pegmatit (Spitzkoppe, Südwestafrika). Deutlich ist die Abhängigkeit der Intensität der rückgestreuten Strahlung vom Beobachtungswinkel zu sehen. Bei gleichem Ausfall- und Einfallswinkel liegt bei $9,1 \mu\text{m}$ aufgrund der Reststrahlenbande eine fast spiegelnde Reflexion vor. Bei anderen Winkeln ändert sich die Intensität, ein spektraler Einfluß auf die Lage des Maximums ist jedoch nicht zu beobachten.

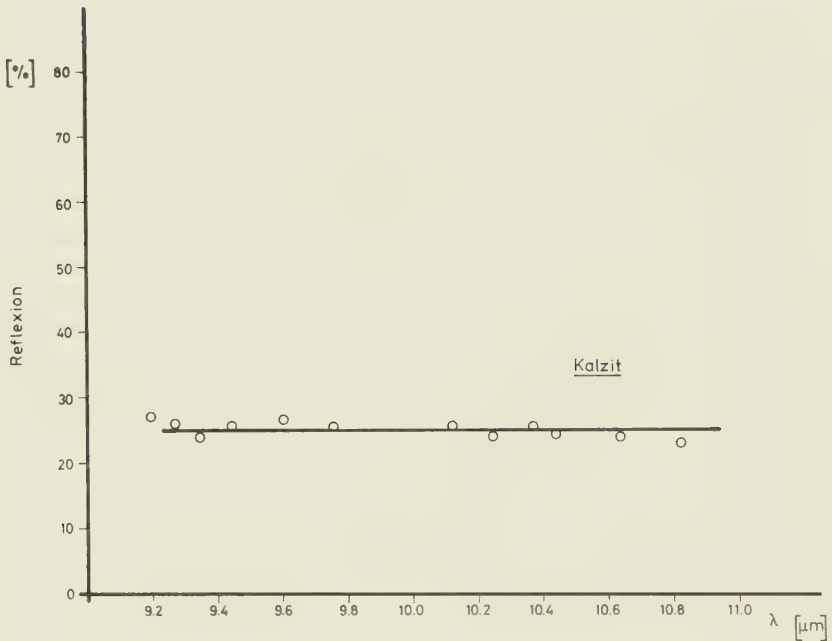


Abb. 14: Reflexionsspektrum eines großkristallinen Handstückes Kalkspat (Swakopmund, Südwestafrika). Die Reststrahlenbanden des Kalkspat liegen außerhalb des Emissionsbereiches des CO₂-Lasers. Es war keine Resonanzfrequenz auffindbar.

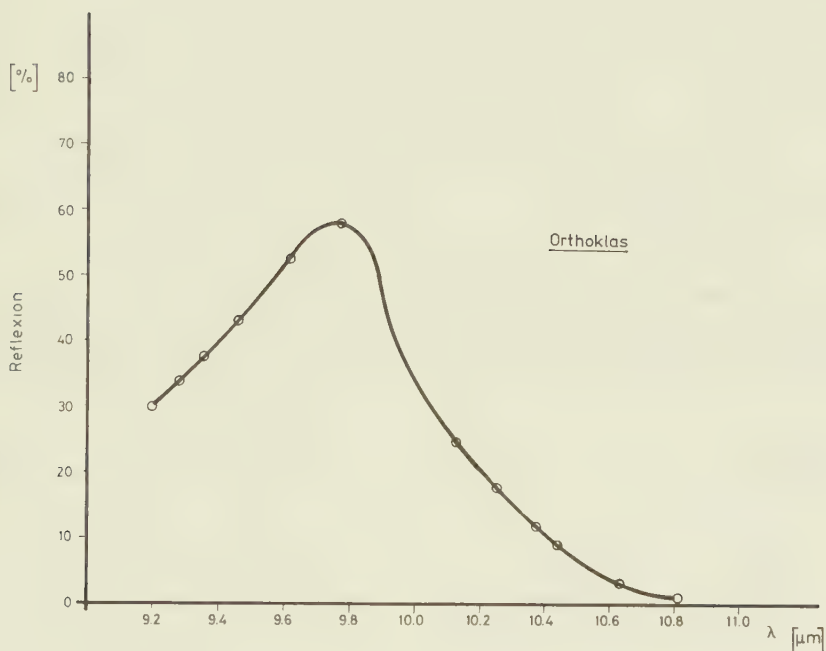


Abb. 15: Reflexionsspektrum eines großkristallinen Orthoklas (Spitzkoppe, Südwestafrika) aus einem Pegmatit. Die Messungen an Graniten der gleichen Lokalität zeigten außer einem Reflexionsmaximum bei $9,1 \mu\text{m}$ aufgrund der Quarzbande ebenfalls ein Maximum bei $9,75 \mu\text{m}$ aufgrund des Feldspatgehaltes gleicher Varietät wie das Handstück aus dem Pegmatit. Fe-Mikroklin dagegen zeigte ein Maximum bei $10,84 \mu\text{m}$ und Sanidin von $10,06 \mu\text{m}$.

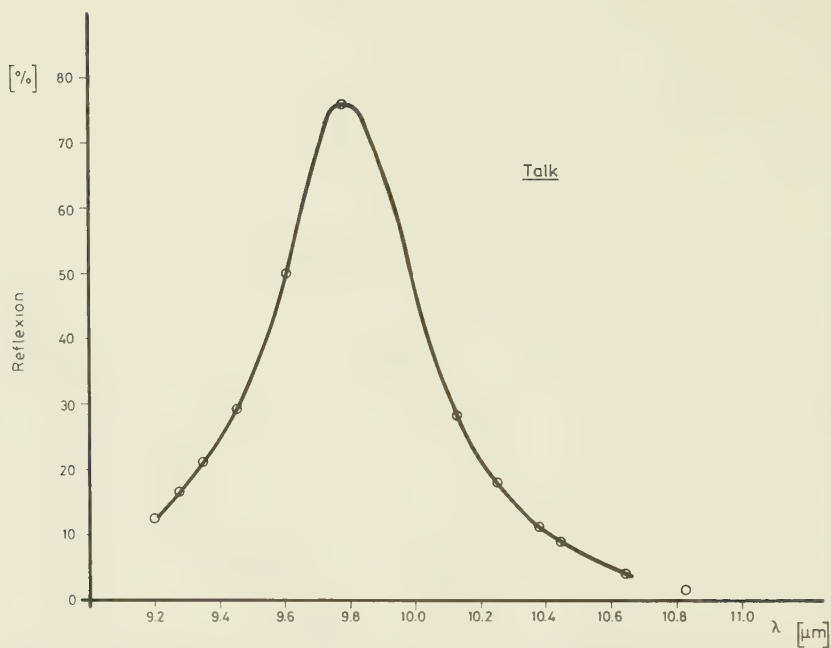


Abb. 16: Reflexionsspektrum von Talk (Omitara Berge, Südwestafrika)

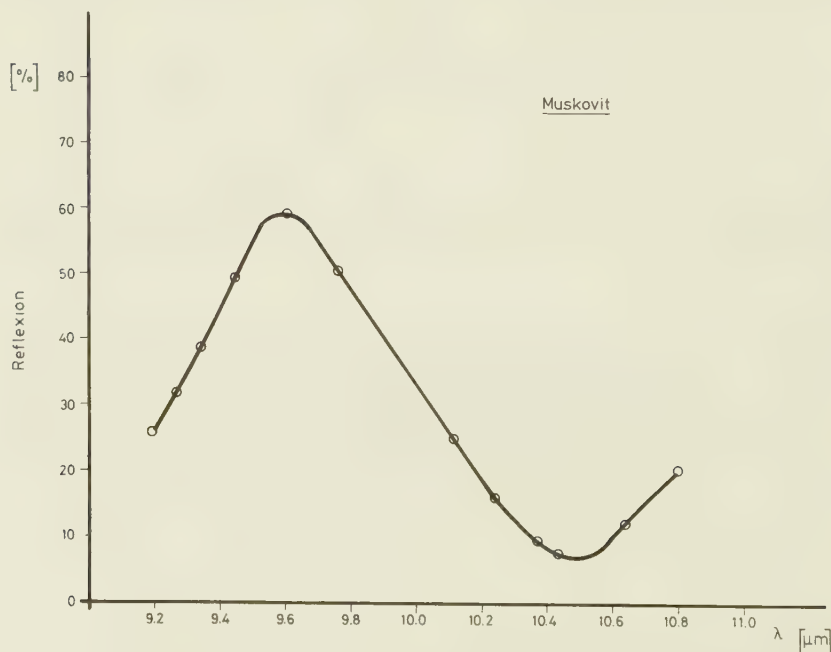


Abb. 17: Reflexionsspektrum von Muskovit (Spitzkoppe, Südwestafrika) aus einem Pegmatit

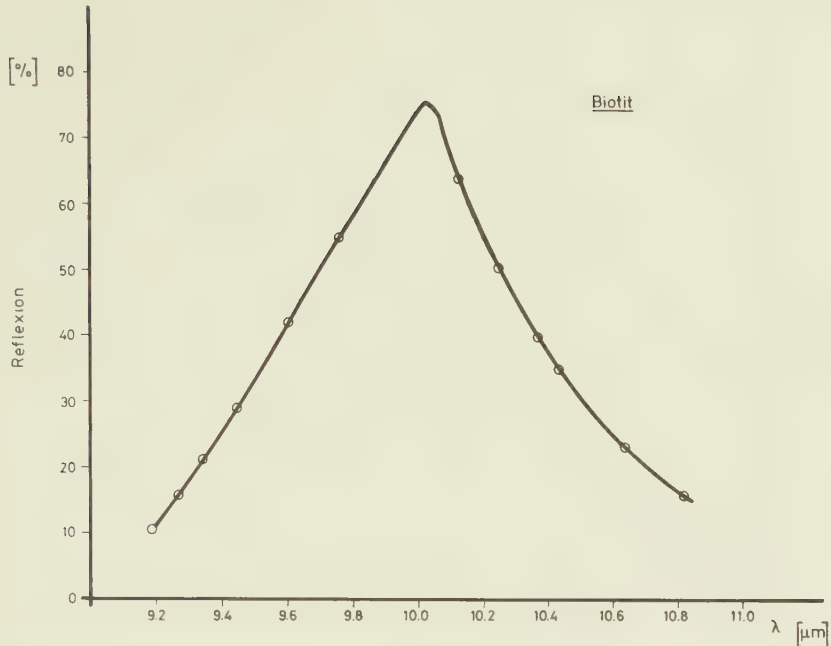


Abb. 18: Reflexionsspektrum von Biotit aus einem Pegmatit (Spitzkoppe, Südwestafrika)

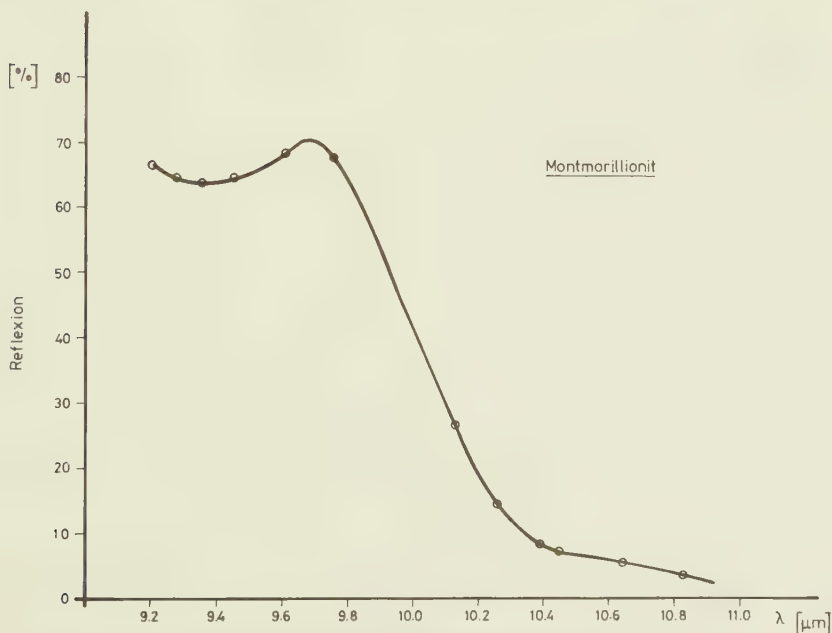


Abb. 19: Reflexionsspektrum von Montmorillonit

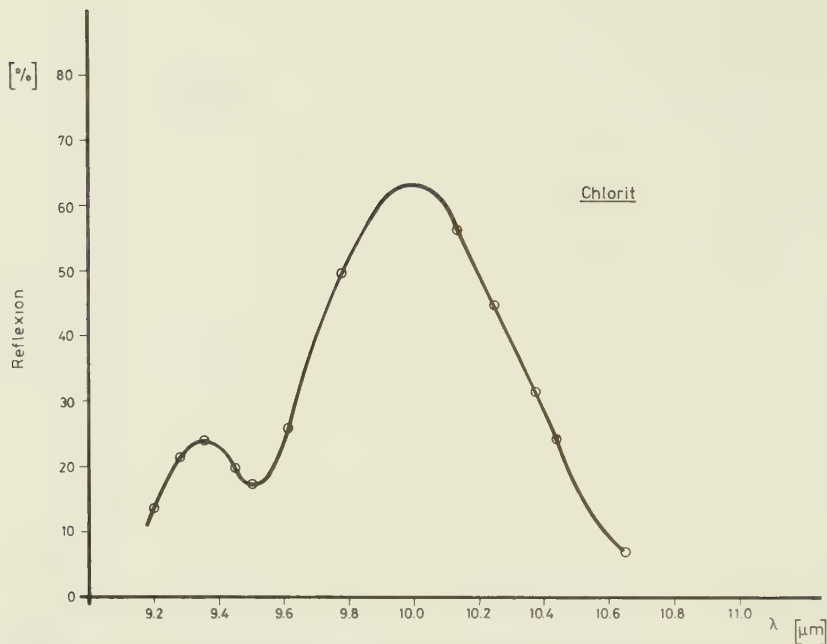


Abb. 20: Reflexionsspektrum von Chlorit (Kobos, Südwestafrika)

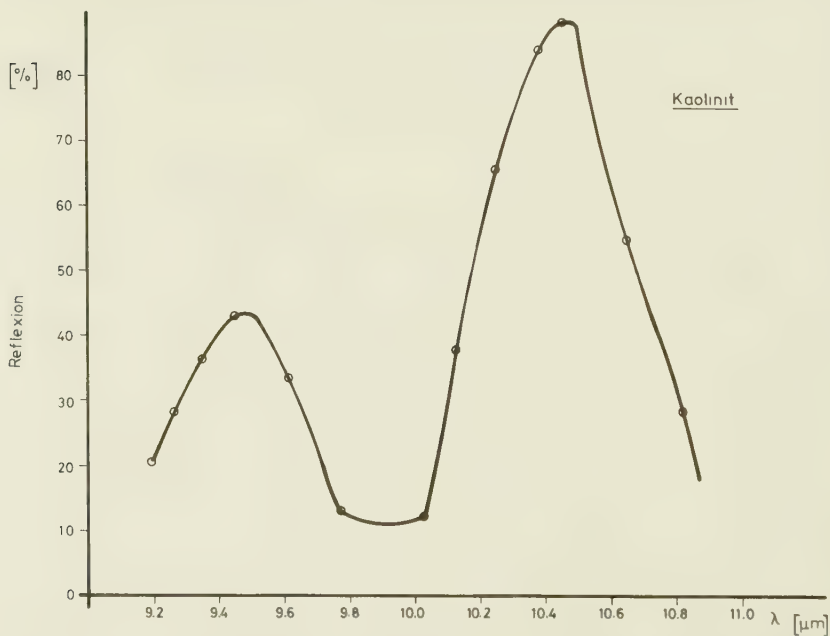


Abb. 21: Reflexionsspektrum von Kaolinit (Grube Schnaittenbach, Oberpfalz)

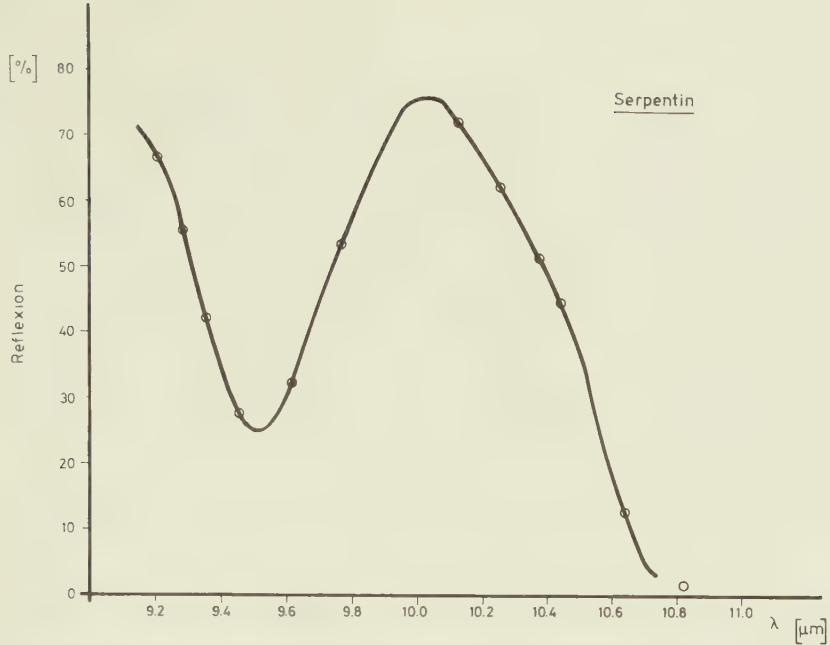


Abb. 22: Reflexionsspektrum von Chrysotil (Fasersepsentin)

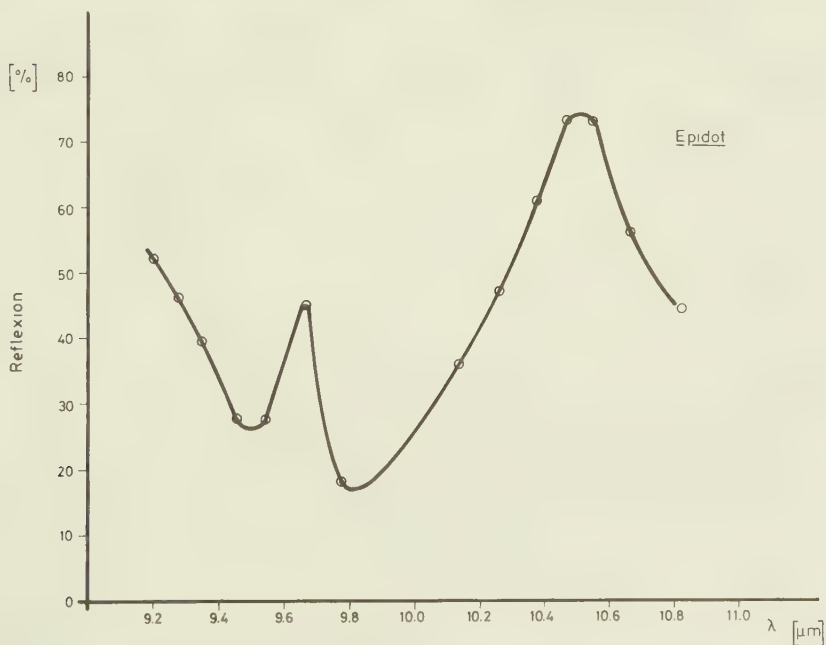


Abb. 23: Reflexionsspektrum von Epidot (Kobos, Südwestafrika)

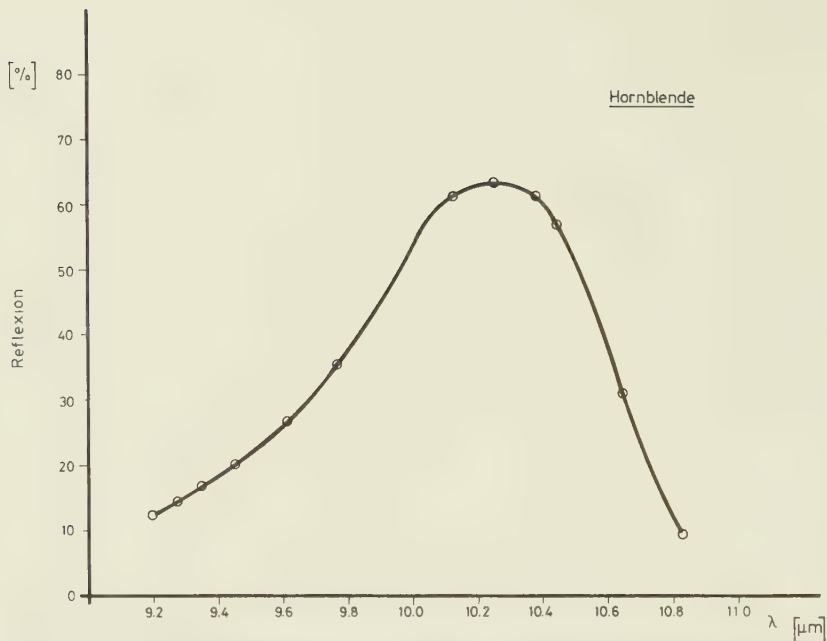


Abb. 24: Reflexionsspektrum von grüner Hornblende (Khomas-Hochland, Südwestafrika)

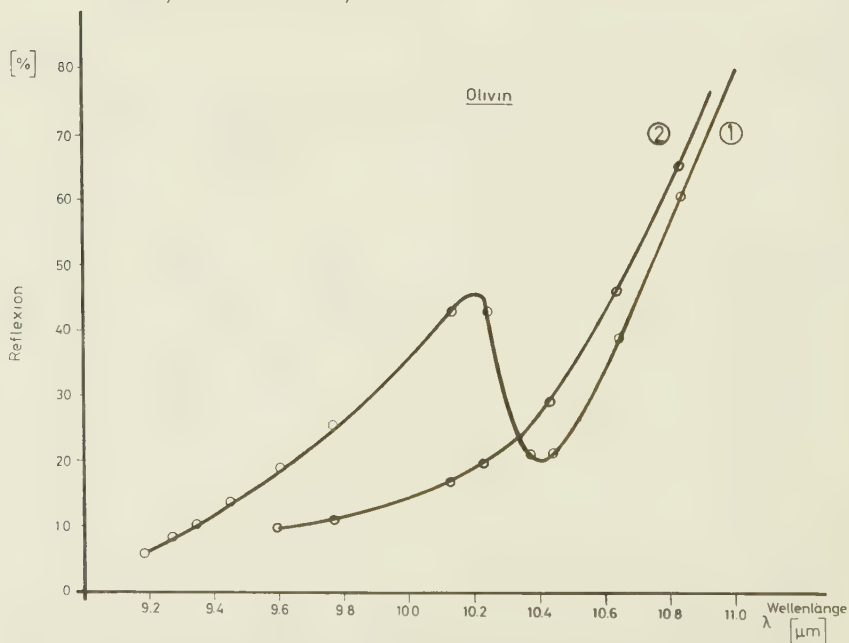


Abb. 25: Reflexionsspektrum von Olivin (Sammlung Geol. Inst. Köln)
 1 Forsterit mit ca. 10 Mol% Fayalit
 2 Fayalit

3.3.3.2 Messungen an natürlichen Bodenproben

In Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurden 5 Bodenproben aus verschiedenen Probengebieten und Tiefen untersucht. Die Ergebnisse sind recht deutlich und können anhand der spektroskopischen Einzelmineralmessungen eindeutig interpretiert werden. Probe Nr. 1, 7 und 11 zeigen ein Reflexionsmaximum bei $10,5\ \mu\text{m}$. Die Proben Nr. 9 und 78 zeigen Maxima bei $9,8\ \mu\text{m}$ (Abb. 23). Aufgrund der Messungen an reinen Mineralen, die mit den Literaturwerten in der Lage der Extremwerte übereinstimmen, kann man bei Probe Nr. 1, 7 und 11 auf hohen Kaolinitgehalt und bei Probe 9 und 78 auf einen erhöhten Montmorillonit-Gehalt schließen. Mit chemischen Labormessungen konnten die Laserspektroskopisch ermittelten Analysen der aufgeführten Bodenproben nachgewiesen werden:

Untersuchungs-Nr.	Feld Nr.	Profil Nr. u. Tiefe in cm	Proben-gebiet	Horizont	Tonminerale
Kenia	1	8/0-15	Mt. Elgon	A1	K,I,M-V
	7	9A/175-250	-"	B24	K,I,M
	9	10/40-65	-"	B21	M,I,K
	11	14/20-60	Cherangani	A12	K
	78	24/17-55	Mwea-Te-bere Irr.	A12	M

K = Kaolinit

M = Montmorillonit

V = Vermiculit

I = Illit

Tab. 4

Intensivere Untersuchungen auch der Begleitminerale und Verbesserungen der Laser-Apparatur lassen aufgrund der sehr deutlichen Ergebnisse hoffen, mit Laser-Reflexionsspektroskopie nicht nur qualitative sondern auch quantitative Aussagen über die Einzelminerale eines Bodens machen zu können und auch Analysen mit einem flugzeuggetragenen Fernmeßsystem durchführen zu können.

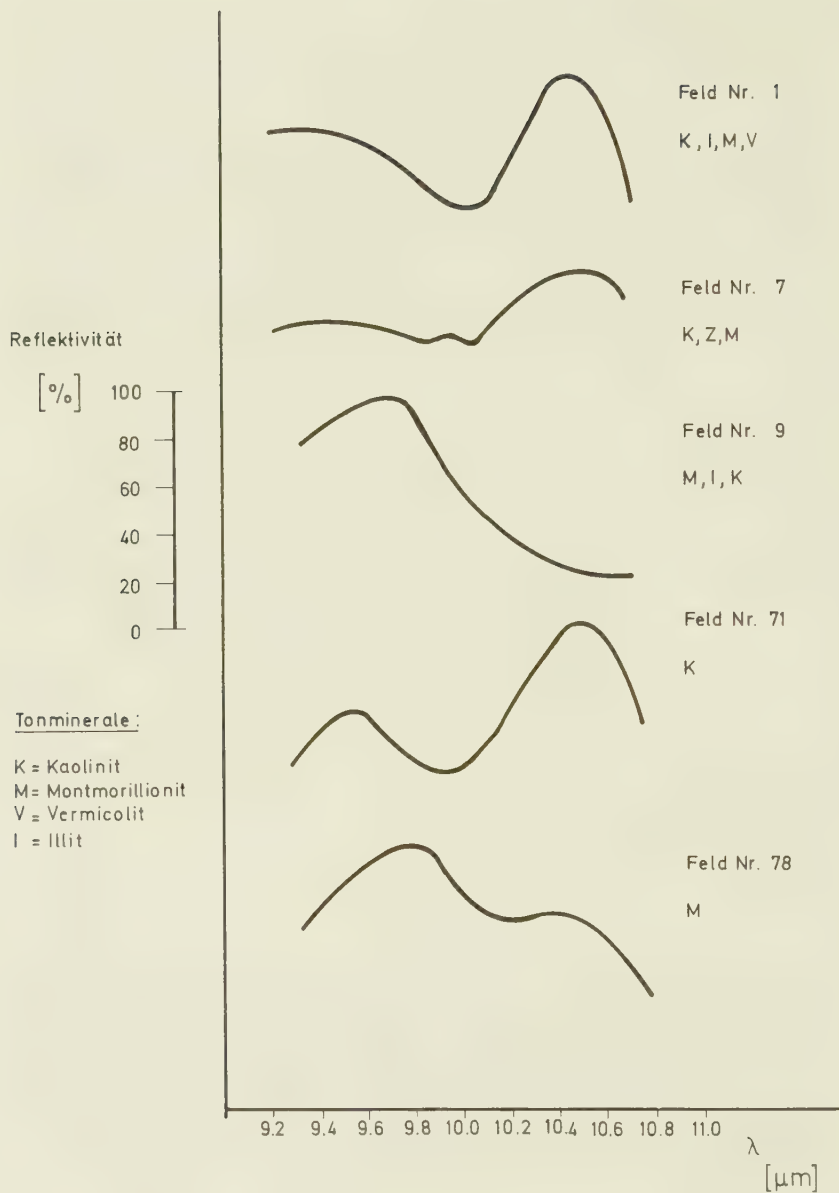


Abb. 26: Reflexionsspektren verschiedener Bodentypen

3.3.4 Messungen an Gesteinsproben

Sehr deutlich prägt sich die hohe Reflektivität um $9\text{ }\mu\text{m}$ aufgrund des SiO_2 -Gehaltes bei sauren Gesteinstypen aus. Ebenfalls gut zu erkennen ist das Feldspatmaximum um $9,8\text{ }\mu\text{m}$.

Signifikant sind ferner die Unterschiede zwischen sauren und basischen Gesteinen. Bereits auf den ersten Blick kann man die Reflexionskurven dahingehend interpretieren. Eine Serie von Versuchen mit unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten hat gezeigt, daß das Ruckstreuungsspektrum des rohen Bruchs mit dem an einer polierten Probe identisch ist.

Es wurden ferner Messungen zur Untersuchung der Feuchtigkeitsabhangigkeit durchgeführt. Ein 24 Stunden bei 60°C voll mit Wasser bedeckter Granit wurde mit einem ebensolange bei 120°C getrockneten Granit spektral verglichen; es war kein Unterschied bemerkbar.

Reflexionsmessungen bei Temperaturen zwischen $+10^\circ\text{C}$ und $+150^\circ\text{C}$ der gleichen Probe ergaben ebenfalls keine Unterschiede.

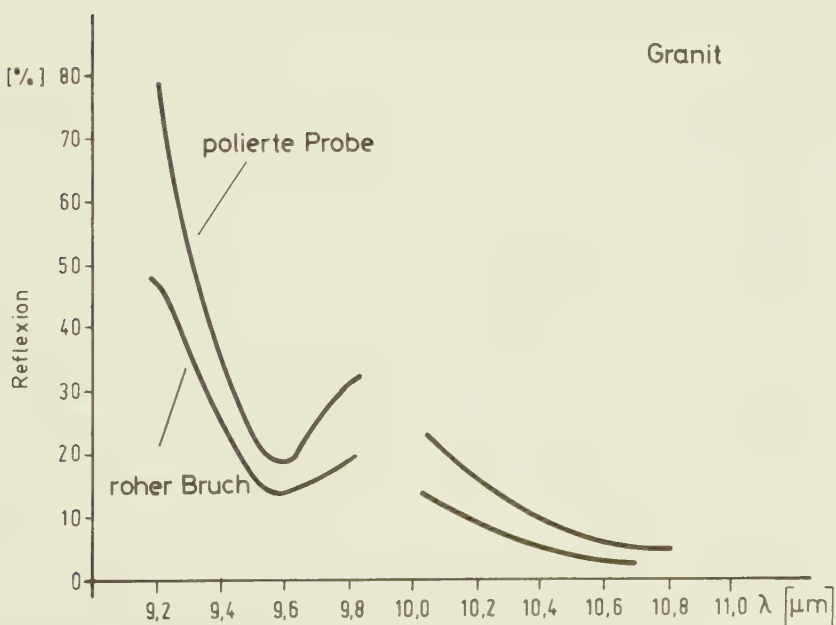


Abb. 27: Reflexionsspektrum von Granit

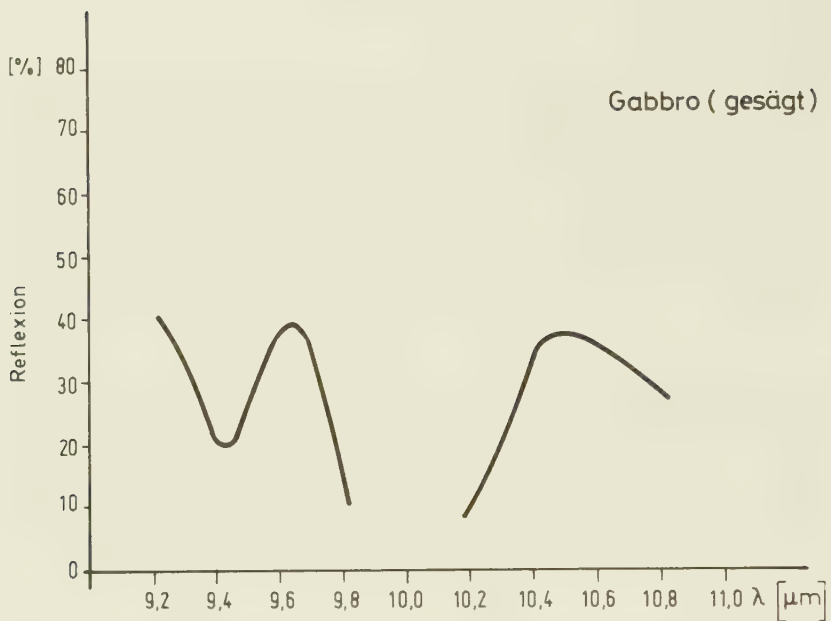


Abb. 28: Reflexionsspektrum von Gabbro

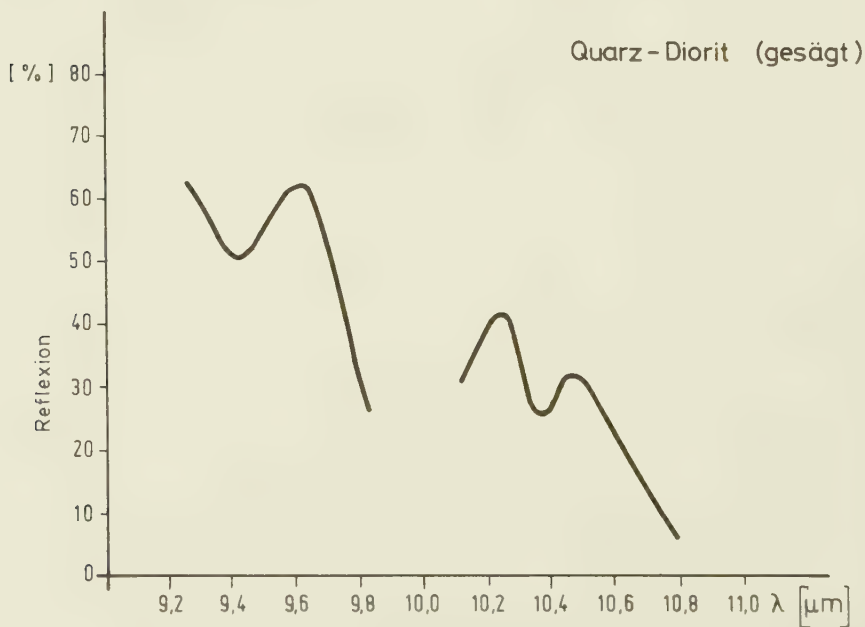


Abb. 29: Reflexionsspektrum von Quarzdiorit

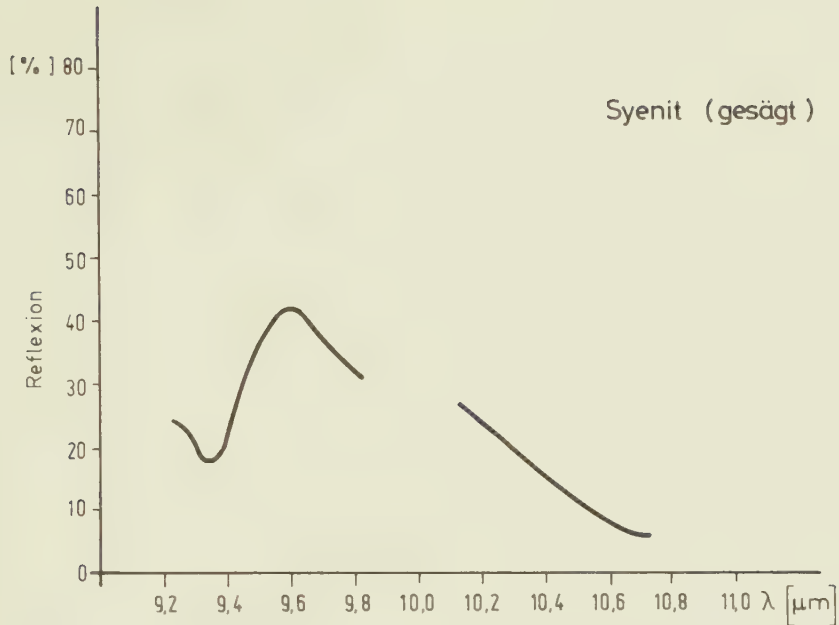


Abb. 30: Reflexionsspektrum von Syenit

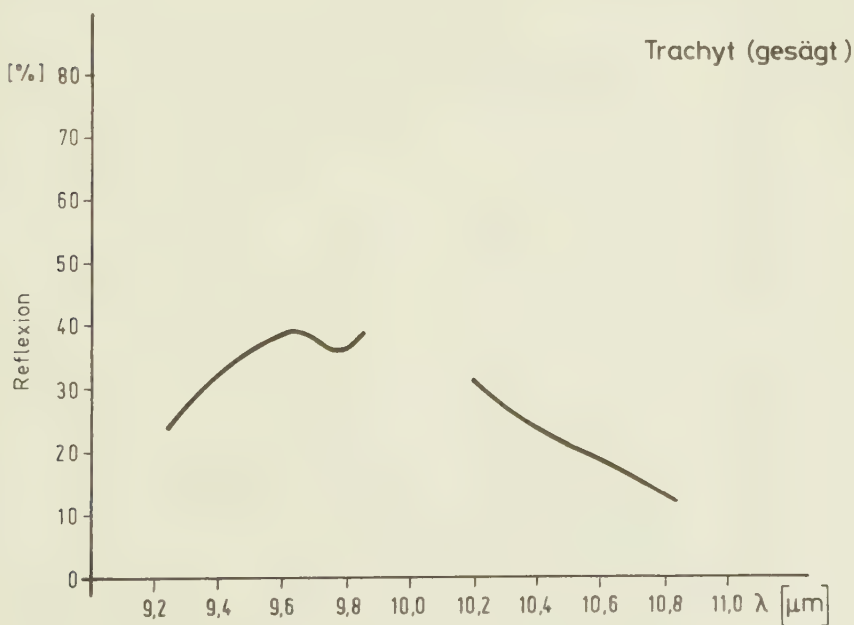


Abb. 31: Reflexionsspektrum von Trachyt

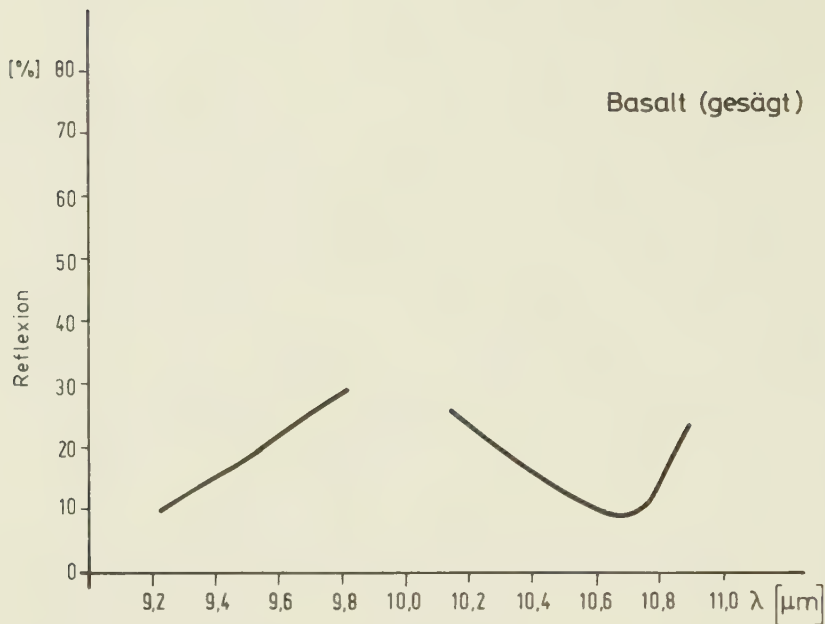


Abb. 32: Reflexionsspektrum von Basalt

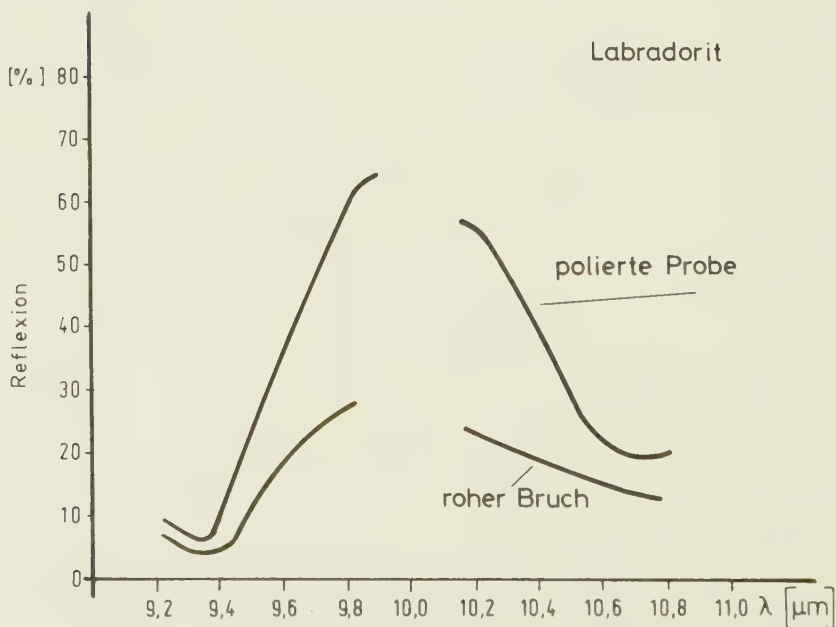


Abb. 33: Reflexionsspektrum von Labradorit

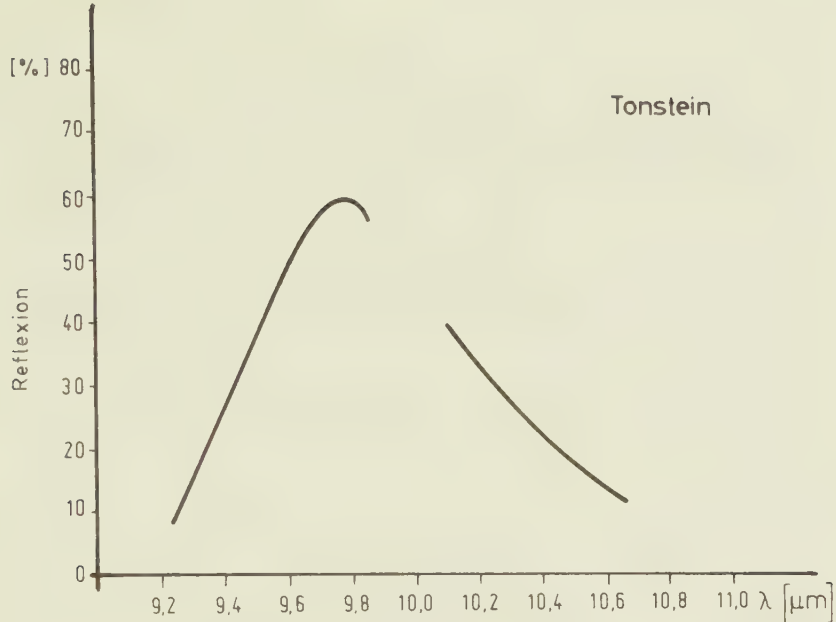


Abb. 34: Reflexionsspektrum von Tonstein

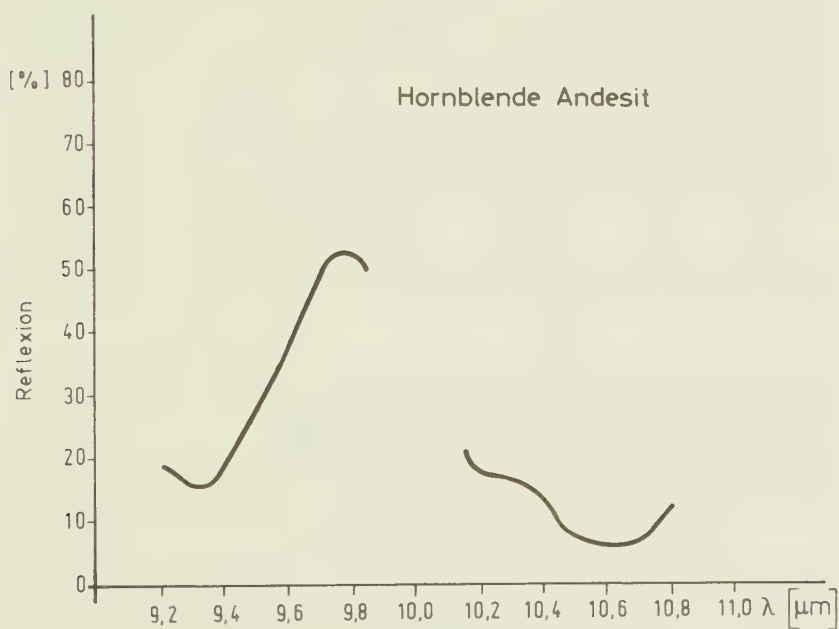


Abb. 35: Reflexionsspektrum von Hornblende-Andesit

3.3.5 Messungen an Vegetation und Wasser, Bodenfeuchteuntersuchungen

Erstaunliche Signifikanz zeigten die Messungen an Vegetationsproben. Das Probenmaterial waren ganz frische Blätter, die vor der Messung vorsichtig mit Wasser von der anhaftenden Oberflächenverschmutzung gereinigt wurden und während der Messung zur Kühlung und Erhaltung des Zelldruckes auf einer Wasseroberfläche schwammen (Abb. 12).

Zur Untersuchung kamen Pappel- (*Populus nigra*) und Eichenblätter (*Quercus pedunculata*) aus der Frankfurter Innenstadt (Hof des Battelle-Institutes).

Wie in Abb. 27 deutlich zu sehen, liegen sowohl beim Pappel- als auch beim Eichenblatt bei $10,47\text{ }\mu\text{m}$ und bei $10,64\text{ }\mu\text{m}$ Reflexionsminima, die an abgestorbenen, verstrockneten Blättern nicht beobachtet werden konnten.

Die Messungen an einer freien Wasseroberfläche (Abb. 27) zeigten deutliche Übereinstimmung der Absorptionsstellen mit den Vegetationsproben. Auch die schwächere Absorptionsstelle des Pappelblattes bei $10,34\text{ }\mu\text{m}$ ist bei der Rückstreuung an Wasser sehr ausgeprägt. Es liegt die Vermutung nahe, daß die Absorptionslinien der Vegetationsproben im Zusammenhang mit ihrem Wassergehalt stehen. Wenn diese Vermutung zutrifft, die durch eingehende Untersuchungen noch zu erhärten ist, stünde mit einem Laser-Zweifrequenzmeßverfahren eine Methode zur Verfügung, die eine direkte Messung des Wassergehaltes der Vegetation auch in einem Fernmeßverfahren gestattet.

Prinzipiell würde man bei einem Zweifrequenzfernmeßverfahren so vorgehen, daß eine Frequenz auf einer Absorptionsstelle, z. B. bei $10,47\text{ }\mu\text{m}$, liegt und die andere dicht benachbart, jedoch außerhalb der Absorption, z. B. bei $10,65\text{ }\mu\text{m}$.

Aus dem Vergleich der Rückstreckoeffizienten der beiden Wellenlängen ließe sich in einem differentiellen Verfahren ein direktes Maß für den Wassergehalt ableiten.

Auf Vorschlag des Verfassers wurden unter Mitarbeit und geowissenschaftlicher Beratung der Universität München (Zentralstelle für Geophotogrammetrie und Fernerkundung) im Rahmen des Forschungsvertrages zwischen der Bundesrepublik Deutschland und dem Battelle-Institut, Frankfurt, Nr. 01 QS 039 AK/WF/WRT 1078-3.2 experimentelle Untersuchungen der physikalischen Grundlagen zur Fernmessung von Boden- und Vegetationsfeuchte durch aktive Infrarot-Reflexionsspektroskopie mit Hilfe der CO_2 -Lasertechnik durchgeführt.

Es hat sich gezeigt, daß das Verhältnis der an einer Sandoberfläche reflektierten Intensitäten auf zwei Laserlinien im $9\text{ }\mu\text{m}$ -Bereich eine empfindliche Funktion des Wassergehaltes der Sandprobe darstellt. Abb. 38

zeigt das Intensitätsverhältnis in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Probe in Gewichtsprozenten. Bei Erhöhung des Wassergehaltes um 8 Gew. % verändert sich das Verhältnis der reflektierten Intensitäten um 40 %. Damit besteht die Möglichkeit, die Feuchtigkeit von Sandoberflächen nach der Methode der vergleichenden Reflexionsspektroskopie zu bestimmen.

Aufgrund dieser Meßergebnisse und der Reflexionsmessungen an anderen Bodenarten ist zu erwarten, daß das Feuchtigkeitsmeßverfahren auf alle Bodenarten anwendbar ist, die in trockenem Zustand zwischen 9 und 11 μm starke spektrale Unterschiede des Reflexionsvermögens zeigen. Mit zunehmender Feuchtigkeit werden diese Unterschiede nämlich infolge des Einflusses des Wasserspektrums reduziert, so daß die vergleichende Reflexionsmessung auf zwei ausgewählten CO_2 -Laserlinien ein Maß für die Bodenfeuchte der Oberflächenschicht liefert.

In einem Vorversuch des Verfassers wurde die Änderung der Reflektivität von Wasser in Abhängigkeit von der Salinität ermittelt. Messungen bei konstanter Wellenlänge (9,5193 μm) bei Variation der Salinität zeigten einen deutlichen Zusammenhang. Auf Vorschlag des Verfassers wurde daraufhin im Rahmen des genannten Entwicklungsvertrages des Battelle-Institutes der Effekt genauer untersucht.

Die Änderung der Reflektivität konnte bestätigt werden (Abb. 40, 41), die Reflexion steigt linear mit der Zunahme der Salinität. Gegenüber reinem Wasser hat eine 10 %ige Salzlösung eine um 15 % höhere Reflektivität. Entsprechend Gleichung 2, Kapitel 2.2.1 ist das auf eine entsprechende Erhöhung des Brechungsindex zurückzuführen. Da eine spektrale Abhängigkeit nicht feststellbar ist, scheidet eine Salinitätsmessung durch Differentialmessung auf zwei benachbarten Wellenlängen aus. Durch Messung der absoluten Rückstreuung dagegen ist eine Bestimmung des Salzgehaltes von Wasseroberflächen durch LASER-Rückstreumessungen möglich.

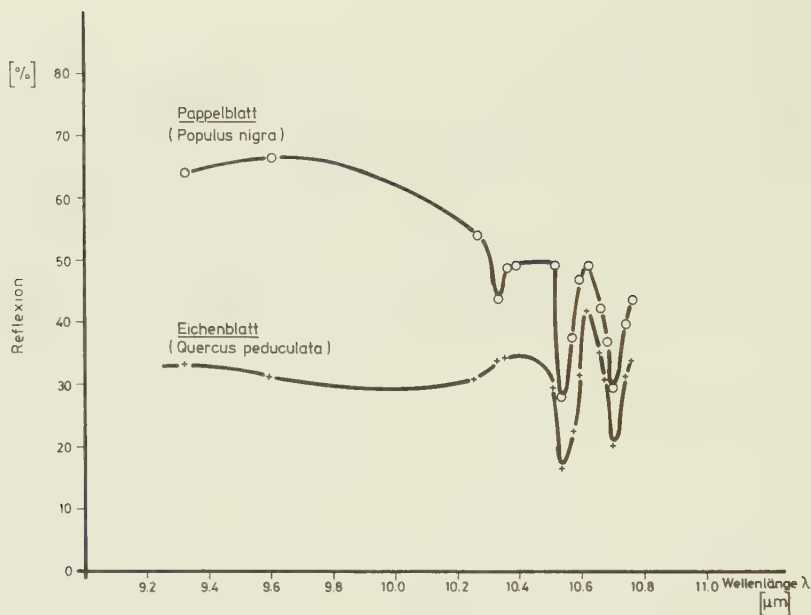


Abb. 36: Reflexionsspektrum von Vegetation

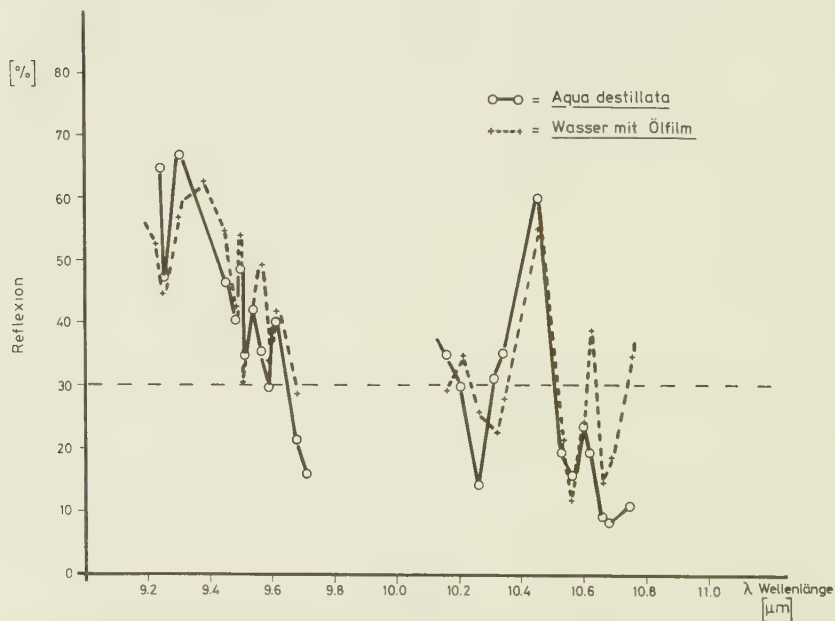


Abb. 37: Reflexionsspektrum einer Wasseroberfläche

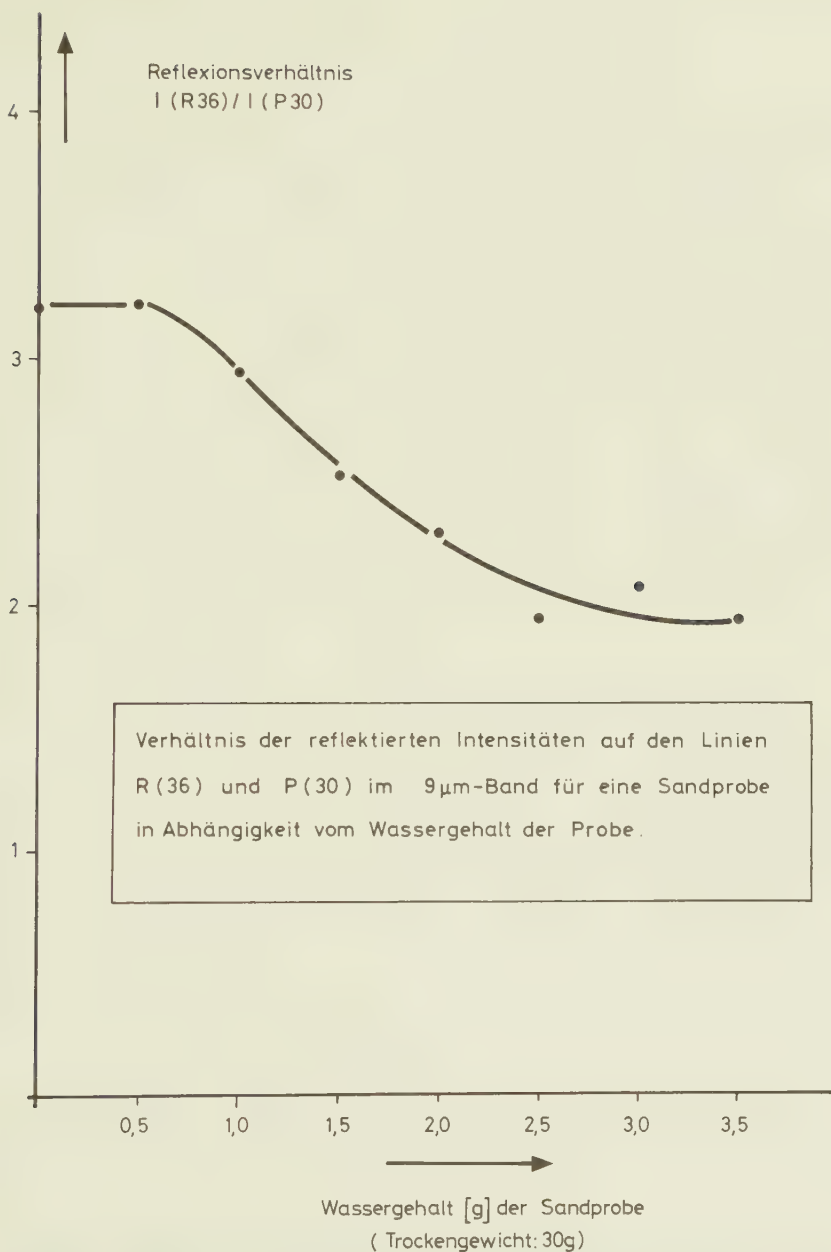


Abb. 38: Verhältnis der reflektierten Intensitäten in Abhängigkeit vom Wassergehalt



Abb. 39: Reflektierte Intensitäten (in willkürlichen Einheiten) auf zwei CO_2 -Laserlinien im $9\ \mu\text{m}$ -Bereich für eine Sandprobe in Abhängigkeit vom Wassergehalt w der Probe

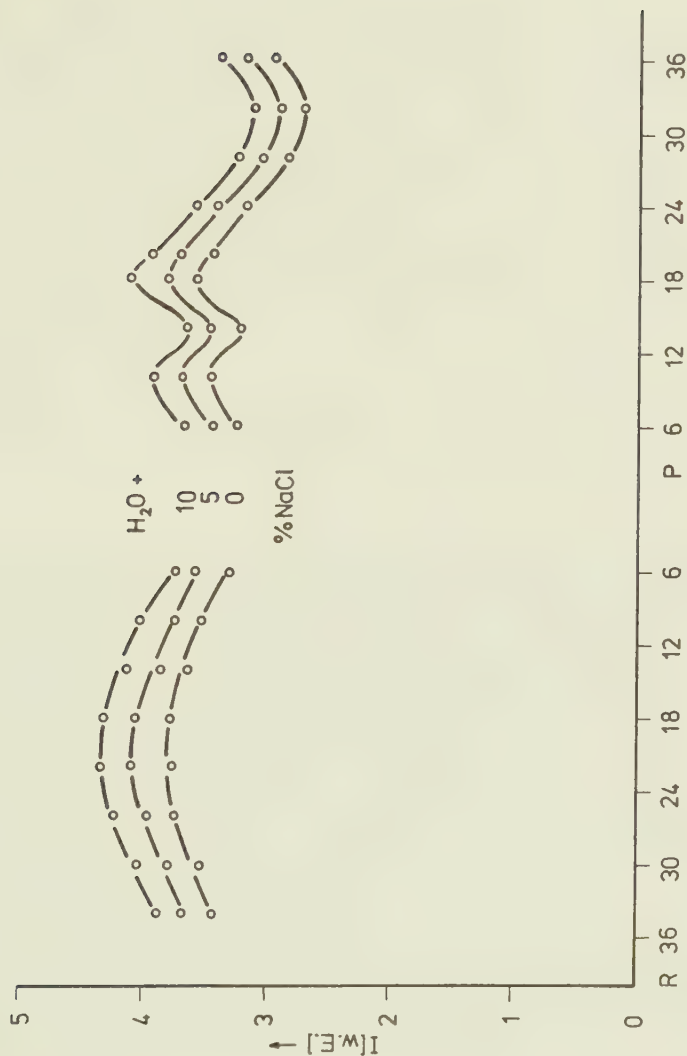


Abb. 40: Reflektierte Intensitäten (in willkürlichen Einheiten) auf den CO_2 -Laserlinien im $9\mu m$ -Bereich für Wasser verschiedener Salinität bei fast senkrechtem Einfall

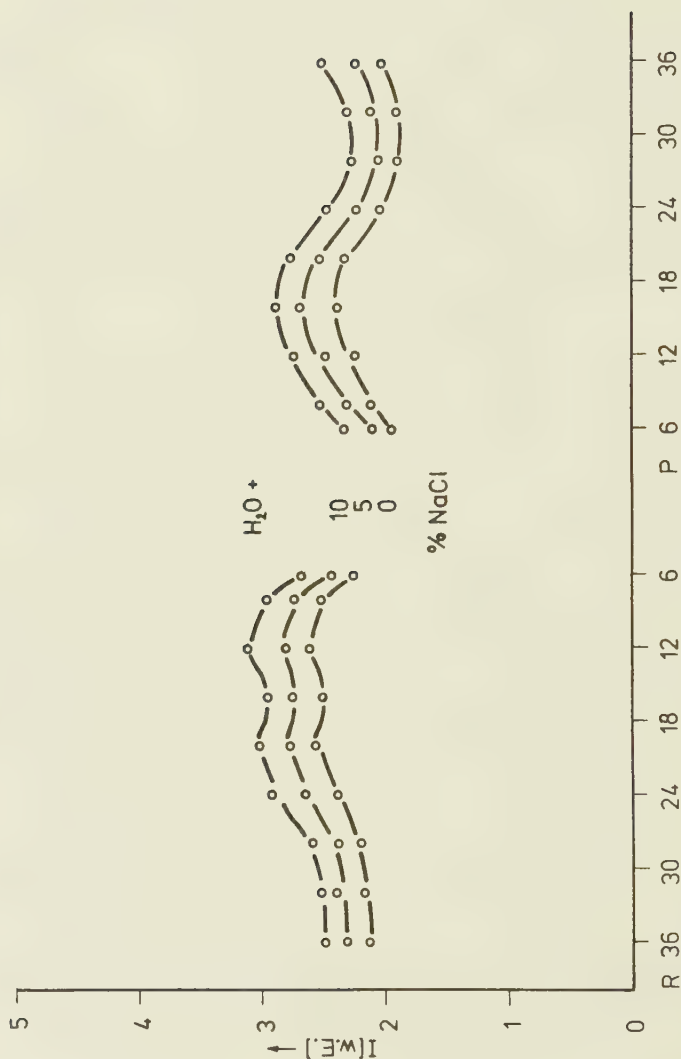


Abb. 41: Reflektierte Intensitäten (in willkürlichen Einheiten) auf den CO_2 -Laserlinien im $10\ \mu\text{m}$ -Bereich für Wasser verschiedener Salinität bei fast senkrechtem Einfall

3.3.6 Messungen an Kaolin-Roherde zur Vorbereitung von Fernmessungen

In Vorbereitung einer Erprobung des Verfahrens mit einem festgestellten 2-Frequenz-Differentiallasermeßgerät vom Flugzeug aus wurde die Kaolinroherde des Tagebaus Hirschau-Schnaittenbach ausgewählt. Die im Labor gemessenen Reflexionsspektren (Abb. 42) zeigen die hohe Reflektivität des Quarzanteils von 75 % im Bereich kürzer als $9.3 \mu\text{m}$. Bei $9.7 \mu\text{m}$ ist ein Maximum aufgrund des Feldspatanteils von 10 % und bei $10.5 \mu\text{m}$ durch den Kaolinitgehalt von 15 % deutlich erkennbar. Die Lage der Maxima der gemessenen Einzelmineralspektren (Abb. 13, 15, 21) ist mit denen der natürlichen Roherde identisch. Zur Durchführung der geplanten Fernmessung wurde eine LASER-Frequenz möglichst kurzwellig bei $9.32 \mu\text{m}$ zur Erkennung des Quarzgehalts festgelegt. Aus technischen Gründen mußte der Vergleichskanal auf die Wellenlänge $10,72 \mu\text{m}$ festgelegt werden.

Labormessungen der Fa. Dorfner brachten Mineralanteile von 75 % Quarz, 5 % Feldspat und 20 % Kaolin (Abb. 43).

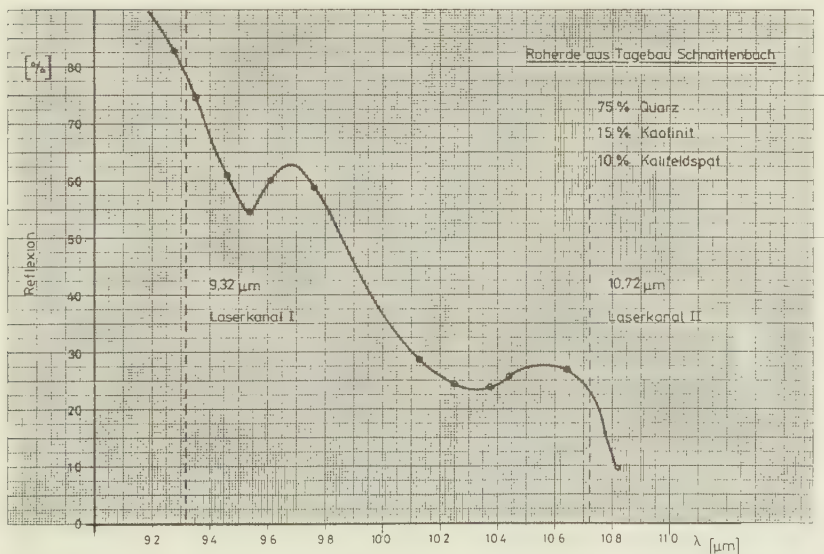


Abb. 42: Reflexionsspektrum: Kaolin-Roherde aus Tagebau Schnaittenbach

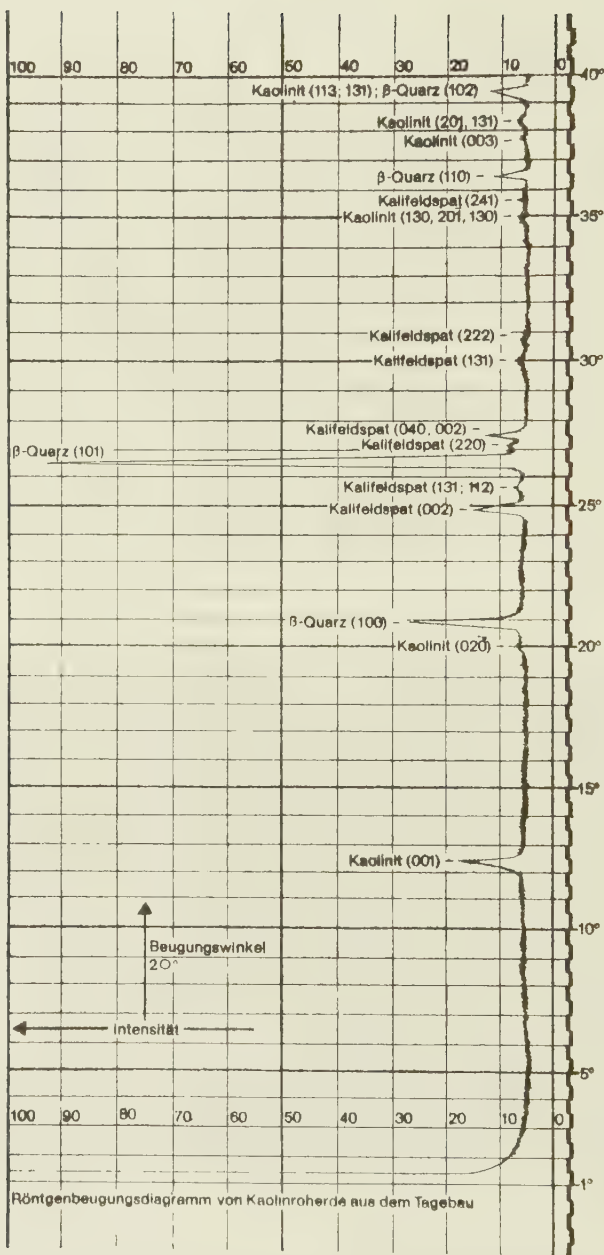


Abb. 43: Röntgenbeugungsdiagramm von Kaolinerde aus dem Tagebau Hirschau-Schnaittenbach



Abb. 44: Ansicht des Meßflugzeuges DO 28 mit eingebautem LASER-Meßsystem

4. Entwicklung und Erprobung eines flugzeuggetragenen Laserfernanalysegerätes

4.1 Bau des Gerätes

4.1.1 Allgemeines

Im Rahmen des Entwicklungsvertrages Nr. 01 QS 078-AK/WF/WE 0275-2.1 der Bundesrepublik Deutschland mit dem Battelle-Institut, Frankfurt wurde ein flugzeuggetragenes LASER-Spektrometersystem zur Messung von Luftverunreinigungen und (auf Vorschlag des Verfassers) (29) zur Messung der Rückstreuungseigenschaften der Erdoberfläche in der Abteilung LASER und Optik des Battelle-Institutes entwickelt. Die spezielle Auslegung des Systems auf die Reflexionsmessungen, besonders die freie Anwählbarkeit der Laserfrequenzen, wurde durch den Verfasser vorgegeben. Die Geräteanordnung wurde diesen Vorschlägen angeglichen und das Gerät entsprechend modifiziert. Die Flugprobung wurde durch die Flugbereitschaft der DFVLR e. V. durchgeführt, wobei der Verfasser als zweiter Flugzeugführer fungierte und für das Gesamtexperiment sowie die Experimentdurchführung voll verantwortlich war.

4.1.2 Prinzipieller Aufbau

Die von den 2 abstimmbaren Lasern erzeugte und mit einem Teleskop gebündelte Strahlung wird auf die Erde gerichtet und dort oberflächen-signifikant reemittiert. Ein Teil der reemittierten Strahlung trifft den Empfangsspiegel und wird durch kohärente optische Überlagerung (Heterodynempfang) mit einer Referenzwelle auf einem Strahlungsempfänger nachgewiesen. Als Referenzwelle dient ein Teil der erzeugten Laserleistung, der aus dem Sendestrahlangang ausgekoppelt wird. Die für den Heterodynempfang erforderliche Frequenzverschiebung zwischen Referenzstrahl und Meßstrahl ergibt sich durch Ausnutzung des Doppellereffektes, der bei der Reflexion der Strahlung an der Erdoberfläche auftritt. Die empfangene Signalleistung ist dann direkt abhängig von dem spektralen Reflexionsvermögen der Erdoberfläche für jede der beiden Laserwellenlängen. Die Einflüsse der Atmosphäre werden dadurch unterdrückt, daß durch die wesentlich geringeren Bandbreiten der störend absorbierenden Gasmoleküle als die Bandbreiten der reemittierenden Minerale der Erdoberfläche durch entsprechende Wahl der Laserwellenlängen die Absorptionslinien atmosphärischer Gase gemieden werden können.

4.1.3 Allgemeines zum optischen System

Das optische System ist im Prinzip ein Michelson-Interferometer, wobei ein Interferometerarm aus der Meßstrecke zwischen Flugzeug und Erdoberfläche besteht. Zum optischen System gehören folgende Funktionseinheiten:

- 2 Laser
- Optik zur Ausrichtung der Laserstrahlung
- Heterodyndetektor
- Sende- und Empfangsteleskop
- Elemente zur Erzeugung der Referenzwellen
- Justierhilfen
- Leistungs- und Wellenlängenmonitor

Für die Auswahl bzw. Entwicklung dieser Einheiten und ihre Integration in das Gesamtsystem sind folgende Kriterien maßgebend:

- geforderte optische Eigenschaft
- mechanische Stabilität
- Justierbarkeit

Sämtliche Funktionseinheiten müssen gegeneinander justierbar sein. Aus Stabilitätsgründen sollten jedoch die Zahl der zu justierenden Elemente und auch deren Masse möglichst klein sein. Bei der Konzeption der Strahlführung wurde daher vorgesehen, daß die Justierung nach vollzogenem Einbau fast ausschließlich über die diversen 45 °-Umlenkspiegel erfolgen kann, während die optischen Geräte (Laser, Wellenlängenmonitor, Teleskope, Heterodyndetektor) fest montiert sind. Der Einfluß mechanischer, thermischer und akustischer Gegebenheiten auf die Strahlführung wird um so geringer, je kürzer die Lichtwege innerhalb des Systems sind. Andererseits steigt die Genauigkeit der Vorjustierung bezüglich des Winkelversatzes zwischen den überlagerten Strahlungen mit der Länge des Lichtweges, der für Justierzwecke zur Verfügung steht. Zur Erzielung einer minimalen Störanfälligkeit bei maximaler Genauigkeit der Vorjustierung ist daher parallel zu dem Lichtweg der Meßstrahlung (durch optische Bauteile ausgefüllt) ein freier Lichtweg für Justierzwecke vorgesehen. Dieser Justierstrahl erleidet bei Dejustierungen der Laser und der Ausrichtungsoptik den gleichen Winkelversatz wie der Meßstrahl. Diese Anordnung bietet den zusätzlichen Vorteil, daß für Justierkontrollen keine Eingriffe in die Meßstrahlung vorgenommen werden müssen. Als zusätzliche Justierhilfe enthält die Apparatur eine kleine rotierende Trommel TR, mit deren Hilfe nach Einschwenken eines Umlenkspiegels auch bei ruhendem System ein Heterodynsignal erzeugt und die Justierung optimiert werden kann (In-Flight-Kalibrierung).

In Abb. 46 ist das optische System schematisch dargestellt. Die Strahlung der beiden Laser wird durch die Ausrichtungsoptik (S 11, S 12, S 13, S 21 und S 22) kollinear überlagert. Nach Durchlaufen des Strahlteilers S 23 wird die Strahlung durch die Teleskope T 1 und T 2 über den Richtungsspiegel S 29 in die Meßstrecke geleitet (die vom Teleskop T 2 empfangene Strahlung durchläuft den Strahlengang in umgekehrter Richtung und wird über den Strahlteiler S 23, die Linse L 21 und den Spiegel S 25 auf den Detektor D 21 fokussiert). Die vom Strahlteiler S 23 ausge-

koppelte Strahlung wird vom Spiegel S 24 in sich reflektiert und nach Durchlaufen der Spiegel S 28 und S 23 über S 25 und L 21 als Referenzstrahlung auf den Detektor D 21 fokussiert. Der hierbei an S 28 ausgekoppelte Strahlungsanteil wird teilweise über die Spiegel S 27 und S 26 auf den Wellenlängenmonitor gerichtet. Ein anderer Teil der Strahlung durchsetzt den Spiegel S 27 und bildet den etwa 1 m langen Justierstrahl. Die Lage des Strahls wird durch die Detektoren D 23 (ausklappbar) und D 24 in kalibrierten Justierfassungen festgestellt. Der Rest der an S 28 ausgekoppelten Strahlung trifft direkt auf den Detektor D 22 zur phasenempfindlichen Leistungskontrolle beider Laser. Zwischen den Teleskopen T 1 und T 2 befindet sich ein ausschwenkbares Dopplersystem, das auch bei ruhender Apparatur die Erzeugung eines Meßsignals zur Funktionskontrolle ermöglicht. Eine Ansicht des Meßsystems zeigt Bild 45.

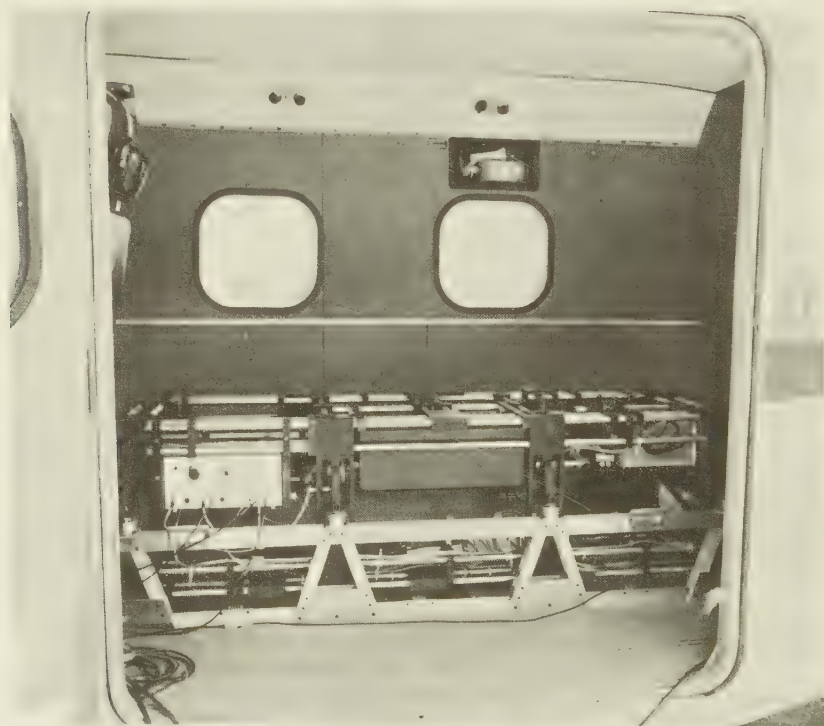


Abb. 45: Ansicht des LASER-Meßsystems in eingebautem, betriebsbereiten Zustand

4.1.4 Vorerprobung

Die Flugerprobung fand in zwei Schritten statt. In einer ersten Erprobung wurde die Funktion der gewählten Empfangsmethode „Heterodynempfang“ nachgewiesen und die Verträglichkeit des Gesamtsystems mit dem Erprobungsflugzeug DO 28 „Sky servant“ ermittelt. Abb. 47 zeigt den Lageplan des Meßsystems in der DO 28 Sky servant. Bild 48 zeigt den Innenraum der DO 28 mit eingebautem Meßsystem. In Stand- und Rollversuchen an Bord der DO 28 wurde über die im System integrierte rotierende Trommel ein Heterodynsignal erzeugt. Signalstabilität und Rauschen erreichten dabei etwa die von den Laborversuchen bekannten Werte. Die starke akustische Belastung (ca. 100 dB) sowie etwa vorhandene elektro-magnetische Störfelder der Triebwerke oder des Bordfunks hatten demnach keinen erkennbaren Einfluß auf das Meßsignal.

Das Vorerprobungsprogramm umfaßte folgende Punkte:

1. Eichung der Teleskopfokussierung für Flughöhen zwischen 200 und 1500 m
2. Eichung des durch den Sende-Empfangsspiegel einstellbaren Vorhaltewinkels für Flughöhen zwischen 200 und 1500 m
3. Nachweis der Unabhängigkeit der Dopplerverschiebung von Unebenheiten der Erdoberfläche
4. Dokumentation des Einflusses verschiedener Reflektierender Flächen (Straße, Wald, Wasser) auf das Meßsignal
5. Messung des bei verschiedenen Flughöhen maximal erreichbaren Signal-Rausch-Verhältnisses.

4.2 Ergebnisse und Diskussion der Pilotmission

4.2.1 Allgemeines

Aufgrund der Vorerprobung wurden eine Reihe von Änderungen und Verbesserungen am System vorgenommen und ein zweiter Laser-Kanal ergänzt. Nach Justage und erneuten Verträglichkeitstests mit dem Meßflugzeug DO 28 Sky servant konnte eine Pilotmission mit Differentialreflexionsmessung durchgeführt werden.

Um einwandfrei interpretierbare Meßwerte zu erhalten, mußten Testgebiete mit möglichst wenig Vegetation und einheitlicher gut bekannter Mineralogie befliegen werden. Als geeignet wurden die Braunkohlen-Tagebaue von Schwandorf (Oberpfalz) und die Kaolin-Lagerstätten von Hirschau-Schnaittenbach (Oberpfalz) identifiziert. Besonders die Kaolin-Tagebaue boten wegen der guten Aufschlußverhältnisse und des hohen Quarzgehaltes der anstehenden Arkose besonders gute Testvoraussetzungen. Als Interpretationshilfe standen hier ferner Labormesswerte zur Verfügung, die in der Vorbereitungsphase mit der Laborspek-

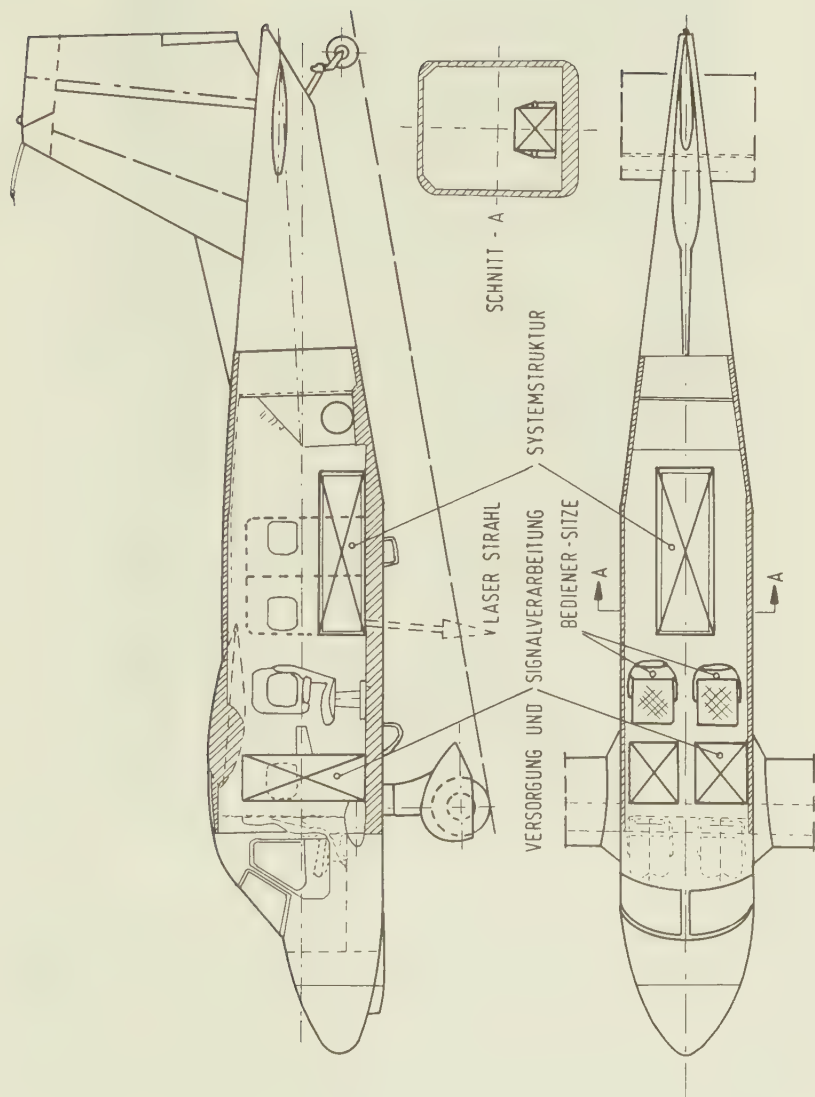


Abb. 47: Lageplan des Meßsystems im Flugzeug DO 28

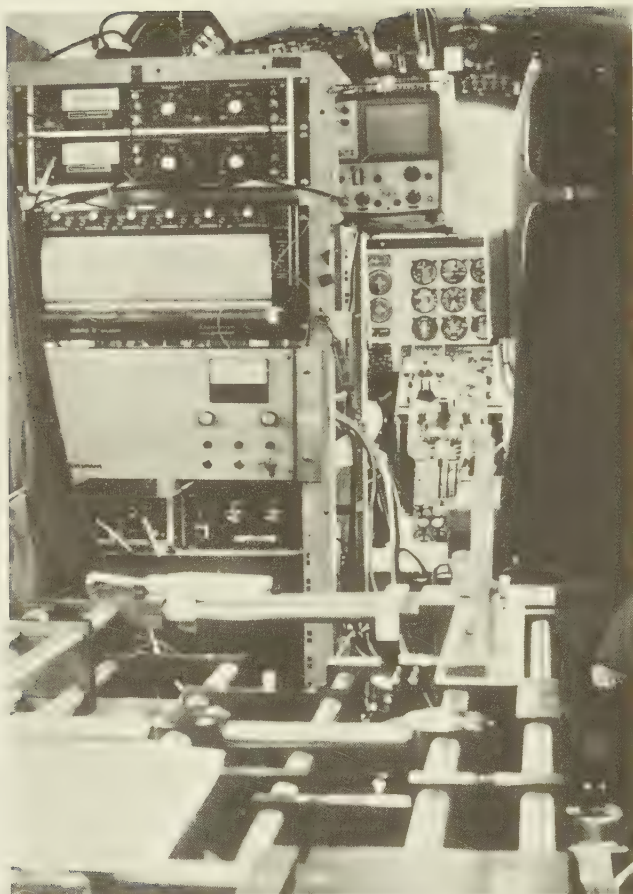


Abb. 48: Blick auf die Bedienungskonsole des Meßsystems im Flugzeug DO 28

trometereinrichtung gewonnen worden sind (s. 3.3.6). Aufgrund der bekannten Randbedingungen wurde eine Flughöhe von 300 Metern festgesetzt und für den Laser-Kanal 1 die Wellenlänge $9,32\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{C}^{12}\text{O}_2^{18}$ -Laser), für den Laser-Kanal 2 die Wellenlänge $10,72\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{C}^{12}\text{O}_2^{16}$ -Laser) gewählt.

Aufgrund der gewählten Laserfrequenzen war das System für die starken Reststrahlbanden des Quarzes empfindlich. Die sehr deutlichen Ergebnisse lassen hoffen, mit einer verbesserten Apparatur Veränderungen des Quarzgehaltes von wenigen Prozent zu ermitteln, als auch durch Abstimmen auf die Kaolin- und Feldspatresonanzfrequenzen im

Fall der Befliegung der Kaolin-Lagerstätte Hirschau das Verhältnis der genannten Minerale zu bestimmen. Aufgrund der systembedingten Integrationszeit von 0,8 Sekunden für Kanal 1 und 0,25 Sekunden für Kanal 2 sind die Flanken der Kurven gerundet. Eine Erhöhung der Sendeleistung und eine Verbesserung der Empfängereigenschaften würden eine Verkürzung der Integrationszeit bewirken und damit die geometrische Auflösung verbessern.

Abb. 49 zeigt die aufgezeichneten Lasersignale bei Überfliegen der Braunkohlengrube. In beiden spektralen Kanälen ist ein merklicher Anstieg der Signalintensität zu verzeichnen, der auf die generell höhere Reflexion von offenliegenden Mineralen im Vergleich zur Vegetation zurückzuführen ist. Der Signalanstieg ist jedoch in Spur A ($9,32 \mu\text{m}$) wesentlich dramatischer (Meßbereichumschaltung um Faktor 3 erforderlich). Insgesamt ist im Mittel die Signalerhöhung von Spur A im Vergleich zur Signalerhöhung von Spur B um den Faktor 3 bis 5 größer. Die Signale sind wegen der schnell wechselnden Bodenbeschaffenheit (Vegetation, Braunkohle, Abraum, gefüllte Wasserlöcher etc.) stark strukturiert.

Ähnliches gilt auch für die insgesamt drei Überfliegungen der Kaolin-Lagerstätte. Die aufgezeichneten Signale sind in den Abbildungen 50 und 51 dargestellt. Deutlich ist eine dramatische Erhöhung des relativen Reflexionsvermögens der Erdoberfläche im $9,3 \mu\text{m}$ -Kanal zu erkennen. Eine rohe Abschätzung für die relative Reflexionserhöhung ergibt folgende Werte:

Überflug	Bereich	Faktor der Reflexionserhöhung
Kaolin 1	a	4
	b	8
	c	12
Kaolin 2	a	2
	b	4,5
	c	2
Kaolin 3	a	4
	b	8
	c	8

Tab. 5

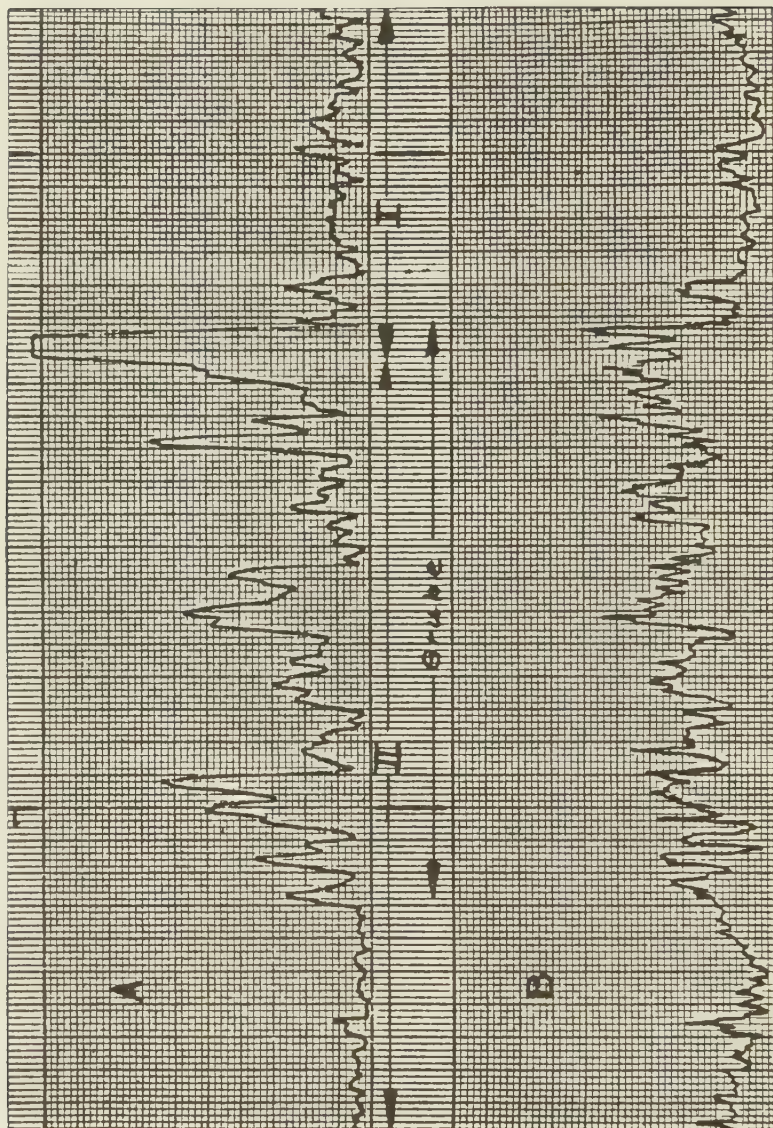


Abb. 49: Überfliegen einer Braunkohlengrube. Schreiber: 2"/min.
 Oben: CO_2^{18} ($\lambda = 9,32 \mu\text{m}$; $t = 0,8 \text{ s}$; Vollausschlag 1 mV (Bereich I), 3 mV (Bereich II))
 Unten: CO_2^{16} ($\lambda = 10,72 \mu\text{m}$; $t = 0,25 \text{ s}$; Vollausschlag 30 mV)

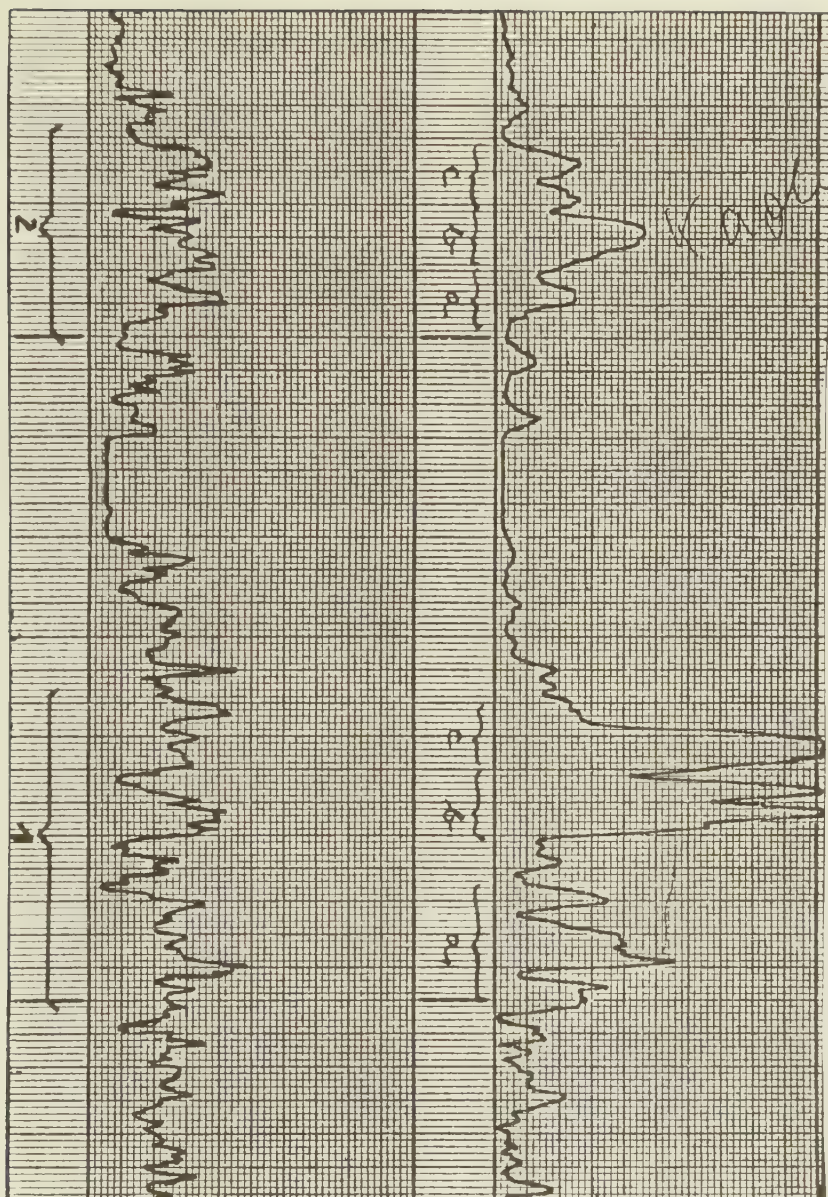


Abb. 50: Überfliegen der Kaolin-Lagerstätte Hirschau-Schnaittenbach
 Oben: CO_2^{18} ($\lambda = 9,32 \mu\text{m}$; $t = 9,8 \text{ s}$; Vollausschlag 10 mV)
 Unten: CO_2^{16} ($\lambda = 10,72 \mu\text{m}$; $t = 0,25 \text{ s}$; Vollausschlag 30 mV)
 1. und 2. Überflug

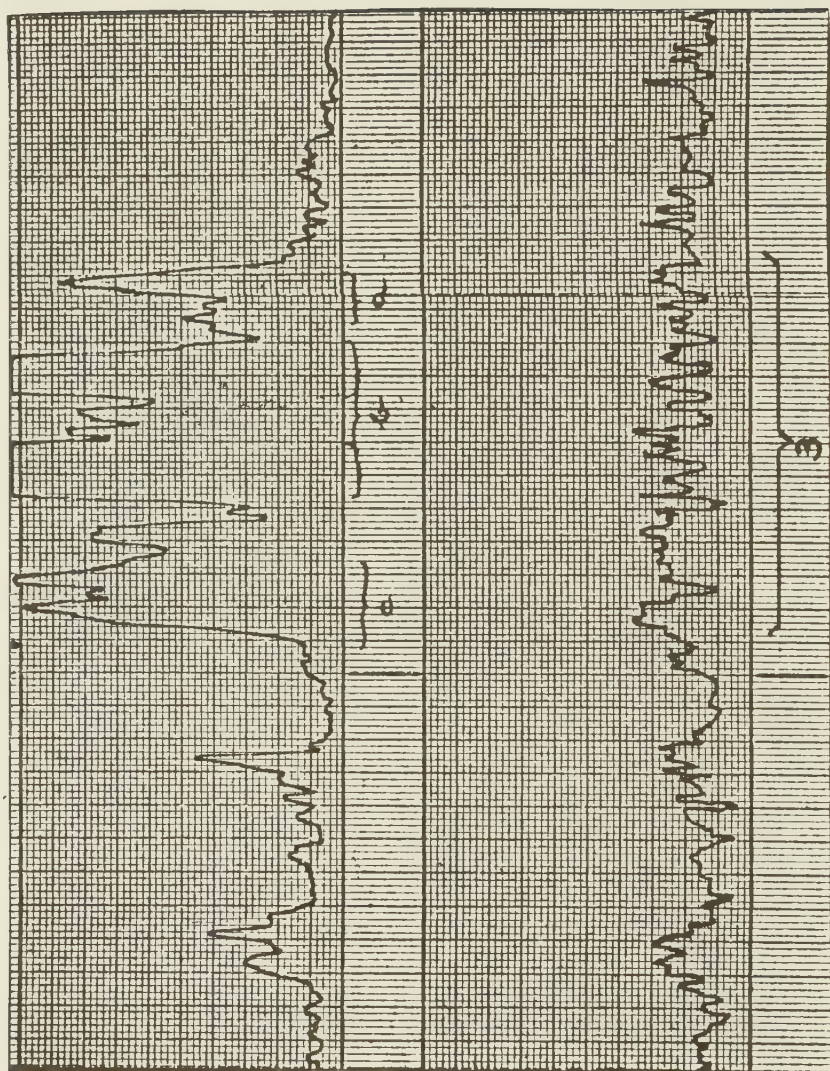


Abb. 51: Überfliegen der Kaolin-Lagerstätte Hirschau-Schnaittenbach
 Oben: CO_2^{18} ($\lambda = 9,32 \mu\text{m}$; $t = 0,8 \text{ s}$; Vollausschlag 3 mV)
 Unten: CO_2^{16} ($\lambda = 10,72 \mu\text{m}$; $t = 0,25 \text{ s}$; Vollausschlag 30 mV)
 3. Überflug

4.2.2 Fernmessungen der Kaolinlagerstätte Hirschau-Schnaittenbach

Der Tagebau der Kaolinlagerstätte Hirschau-Schnaittenbach wurde insgesamt dreimal überflogen.

Da das Meßsignal des ersten Überfluges die Grenze des Meßbereichs erreichte und überschritt, wurde beim zweiten Überflug die Meßverstärkung zurückgeschaltet. Um eine feinere Auflösung der weniger gut reflektierenden Oberflächen zu erzielen, wurde beim dritten Überflug die Verstärkung wieder auf den Wert des ersten Überfluges geschaltet.

In Abb. 52 ist das Verhältnis aus Kanal 1 zu Kanal 2 über die Zeit bzw. der Flugstrecke des dritten Überfluges aufgezeichnet. Durch Vergleich mit der photographischen Aufnahme des Testgebietes lassen sich die Oberflächenmerkmale der Kaolingrube leicht erkennen. Die absolute rückgestreute Energie wurde durch Verhältnisbildung aus den beiden Kanälen eliminiert.

Die Kurve in Abb. 52 stellt damit in erster Näherung aufgrund der festgelegten Laser-Wellenlängen den relativen Quarzgehalt der reflektierenden Oberfläche dar.

Die Verstärkung der beiden Kanäle wurde so gewählt, daß beim Überflug von Vegetation das Verhältnis ungefähr gleich eins zu zwei war. Unmittelbar nach Überflug des Grubenrandes stieg das Verhältnis auf bis zu zwölf zu eins.

Jeweils beim Überflug von Gebäuden und den umgebenden Büschen sank das Reflexionsverhältnis, auch war ein scharfer Einbruch beim Überflug des Teiches in der mittleren Grube zu beobachten. Im westlichen Teil der Grube führte die Flugstrecke entlang eines Weges, dessen Kanal 1-Reflektivität bis zu einem Gebüsch stetig abnahm. Im äußersten Westen wurde eine Abraumhalde mit tonigem Material geringeren Quarzgehaltes überflogen. Unmittelbar nach Überflug des westlichen Grubenrandes ging das Verhältnis von Kanal 1 zu Kanal 2 wieder stationär auf das für Vegetation eingestellte Verhältnis von eins zu zwei zurück.

4.3 Allgemeines zum Testgebiet Hirschau

Im Raum Hirschau-Schnaittenbach/Oberpfalz befinden sich die größten Kaolin-Vorkommen der Bundesrepublik Deutschland. Ihre Entstehung verdanken sie azendenten und deszendenden Wässern, die Bestandteile der klastischen Sedimente, vornehmlich die Kalifeldspäte, postsedimentär in wasserhaltige Tonerde-Silikate (Kaolin) umgewandelt haben.

Die Paragenese der Lagerstätte setzt sich im wesentlichen aus Quarz, Kaolinit und einem Kalifeldspat neben Spuren von Glimmermineralen (Muskovit, Biotit und illitischen Tonminerale) zusammen. Akzessorisch treten die Minerale Magnetit (Fe_3O_4), Rutil und Anatas, beides Modifika-

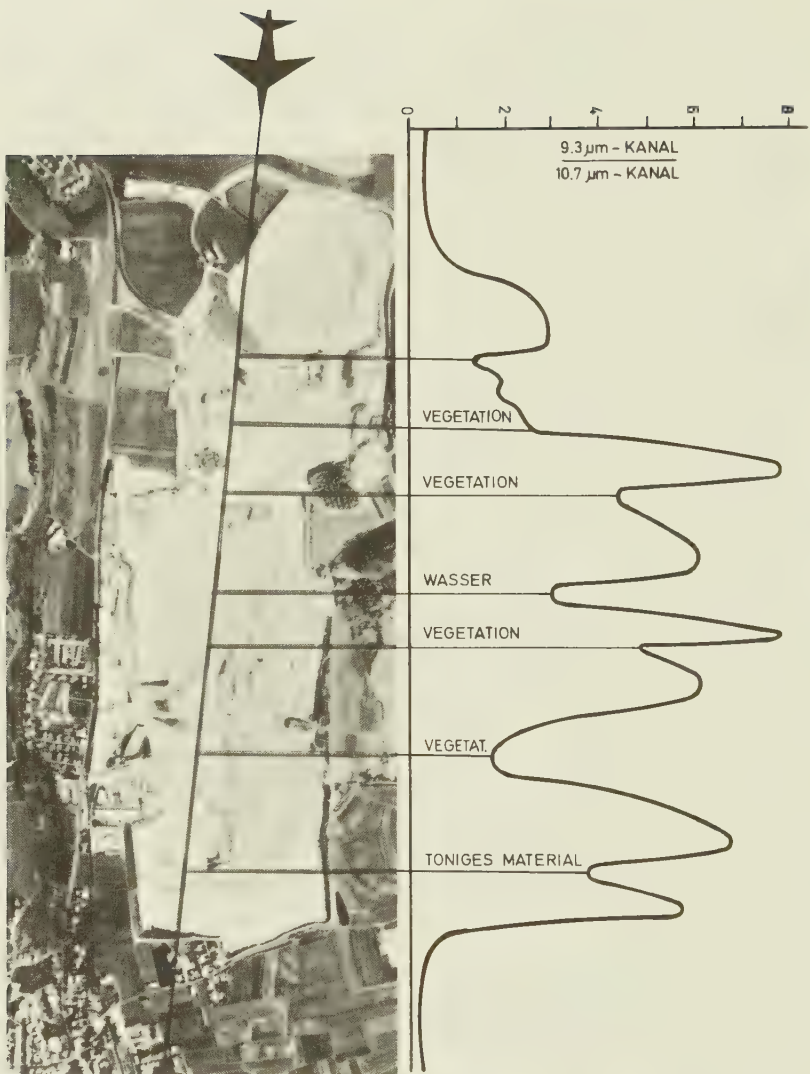


Abb. 52: Kaolintagebau Hirschau; normierte Rückstreuung der Quarz-Reststrahlenbande. Die Verhältniskurve stellt in erster Näherung den relativen Quarzanteil der Oberfläche dar.
(Luftbild freigegeben durch Reg. Präs. Darmstadt Nr. 21/47)

tionen des Titandioxids, Ilmenit (FeTiO_3), Zirkon (ZrSiO_4), Monazit (CePO_4), Xenotim (YPO_4) und sehr selten Turmalin, Staurolith, Andalusit, Sillimanit und Chrysoberyll auf. Als sekundäre Umwandlungsprodukte kommen u. a. Limonit und Titanit („Leukoxen“) vor.

Mit ca. 75 Gew. % stellt der trigonaltrapezoedrisch kristallisierende Tiefquarz (β -Quarz), der sich bei $573^\circ \text{ C}/1 \text{ atm}$ reversibel in den hexagonaltrapezoedrisch kristallisierenden Hochquarz (α -Quarz) umwandelt, mengenmäßig den größten Anteil der Roherde dar. Die runden bzw. kantengerundeten und meist klardurchsichtigen Quarzkörner, die im kristallographischen Sinn reine Einkristalle sind, zeigen bisweilen eine raue Oberfläche mit Vertiefungen und unregelmäßigen Sprüngen. Nur im Grobsand und in den Geröllen treten milchigtrübe Körner auf. Idiomorph ausgebildete Kristalle sind jedoch bis in die feinsten Fraktionen nicht zu beobachten.

Häufig sind Quarz-Aggregationen mikroskopisch festzustellen, wobei die einzelnen Körner mit einem Gemisch aus feinem Quarz, Kaolin und Kalifeldspat verkittet sind. Vereinzelt finden sich auch Quarzkristalle mit eingewachsenen Rutil-Nädelchen, die jedoch nur mikroskopisch im Dünnschliff zu erkennen sind. Die physikalischen (große Härte, geringe Spaltbarkeit usw.) und chemischen Eigenschaften (Beständigkeit gegen fast alle Säuren und alkalischen Reagenzien) bedingen im wesentlichen die industrielle Verwertung der Quarzsande.

Die Lagerstätte ist in einer Mulde abgelagert und geringfügig tektonisch beansprucht worden. Die Lagerstättenbildung begann in der Buntsandsteinzeit, in der auf aufgeschüttete Sandschichten der Permotrias (Rotliegendes, Zeichstein) (z + su) und des unteren Buntsandsteins (Kulbacher Konglomerat) (sm₁) große Sandmassen (aus 80 % Quarz und 20 % Feldspat bestehend) erneut abgelagert wurden. Die Schüttung des Sediments erfolgte in nordwestlicher Richtung.

Die Kaolinitbildung wird durch Einwirkung von sauren Grundwässern und schwachen hydrothermalen Einflüssen vornehmlich auf Feldspate, erklärt. Hierbei wurden unter Abführung von Alkalien, Erdalkalien und Kieselsäure wasserhaltige Aluminiumsilikate (Kaolin) gebildet.

Die Mächtigkeit der abbauwürdigen Schichten beträgt im Kaolinbecken zwischen 25 und 60 m, ihre Erstreckung von West nach Ost ca. 4 km. Eine Differenzierung der Kaolinitbildung tritt sowohl in Ost-Westrichtung als auch zur Teufe hin auf. Im westlichen Teil der Lagerstätte sind unzersetzte Feldspate noch reichlicher vorhanden, nach Osten hin nimmt der Kaolingehalt im Bereich der dort befindlichen Tagebaue zu.

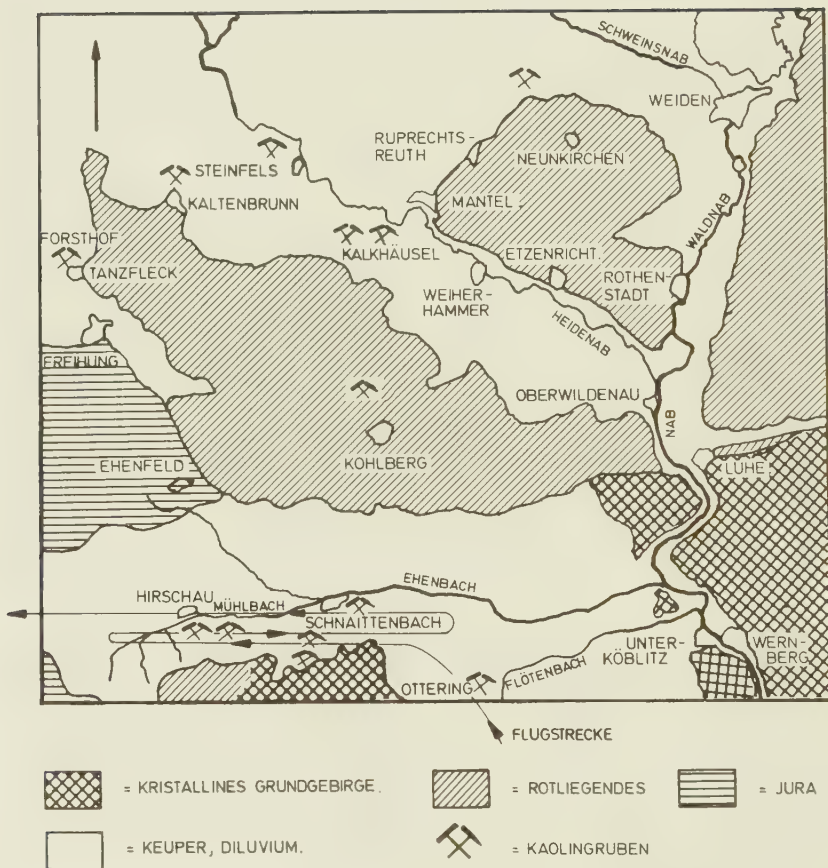


Abb. 53: Übersichtskarte der Kaolinvorkommen in der Oberpfalz

5. **Schlußfolgerungen im Hinblick auf die geologische Nutzbar- machung des Verfahrens und Ausblick**

5.1 Geowissenschaftliche Relevanz

Die Labormessungen der Rückstreuereigenschaften der Stoffe der Erdoberfläche haben gezeigt, daß aufgrund der Signifikanz der Spektren ein Analyseverfahren zur Verfügung steht, das den herkömmlichen optischen Methoden überlegen ist. Das Verfahren eignet sich neben den Anwendungen in Geologie, Mineralogie und Pedologie ferner für Vegetationsuntersuchungen, Wasseruntersuchungen und sonstige Beobachtungen natürlicher oder künstlicher Oberflächeneigenschaften.

Die aufgrund der speziellen LASER-Eigenschaften gegebene Möglichkeit, das Verfahren über große Entfernungen und vom Flugzeug aus anzuwenden, erweitert den Nutzen für die Geowissenschaften beträchtlich, insbesondere dann, wenn durch eine geeignete Vorrichtung flächige Abbildungen der Erdoberfläche erzeugt werden können.

Besonders zu nennen sind:

- Kartierung von Verwerfungen und Bruchzonen aufgrund der vom umgebenden Material abweichenden Mineralogie, insbesondere durch höheren Quarzgehalt zur Prospektion von Ganglagerstätten. Hydrothermale Ganglagerstätten stellen den verbreitetsten Erz-Lagerstättentyp dar.
- Ermittlung des Verwitterungsgrades von Gesteinen und Böden aufgrund der chemischen Änderungen. Die Messungen haben gezeigt, daß z. B. Feldspat und seine Verwitterungsprodukte sich reflexions-spektral ganz deutlich unterscheiden lassen, ebenso Olivin und Serpentin.
- Zur Prospektion magmatogen-sedimentärer Kieslager kann die Möglichkeit beitragen, die Initialmagmatite aufgrund ihres sauren bis intermediären Chemismus, der sich deutlich aus dem Reflexionsspektrum ermitteln läßt, aufzufinden.
- Kartierung von Bodentypen. Die Messungen und die Literaturwerte haben gezeigt, daß sich alle bodenbildenden Minerale spektral stark unterscheiden. Es ist somit die Möglichkeit gegeben, Bodentypen beim Überfliegen zu unterscheiden oder sogar gute Grundlagen zur Anfertigung pedologischer Karten zu liefern.
- Der oft deutliche Mineralgehalt von Seifenlagerstätten oder der Mangel des umgebenden gut identifizierbaren Quarzes ermöglicht die Prospektion von sekundären Schwermineralkonzentrationen (Seifenlagerstätten). Aussicht auf die Bildung von Schwermineralkonzentrationen besteht in jüngeren Lockergesteinen wie Küsten- und Flußsanden, am Fuß von Dünen, an den Rändern von Trockentälern und Meeresufern. Auch in Sandwüsten können durch Ausbla-

sung des leichten Quarzsandes Anreicherungen von nutzbaren Mineralen vorkommen.

- Die deutlichen Signaturen, die die Messungen an Wässern ergaben, zeigen eine Möglichkeit auf, Sedimentgehalt, Salinität oder Planktongehalt oberflächennaher Schichten zu messen. Der Gehalt an Schwebestoffen, Lösungen oder Suspension kann möglicherweise zum Auffinden submariner Lagerstätten führen.

5.2 Vorschlag für ein Verfahren zur Aufsuchung von Kohlenwasserstofflagerstätten

Aufgrund der mit dem vorgeschlagenen LASER-System ebenfalls möglichen Messung von Spurengasen in der Atmosphäre (9) durch Differentialabsorption ist eine Möglichkeit zur Prospektion von Kohlenwasserstofflagerstätten denkbar.

Aus Kohlenwasserstofflagerstätten (auch Off-shore) sickern häufig ganz erhebliche Mengen von Gas durch die hangenden Schichten, die besonders im Zuge von Verwerfungen zu Konzentrationen führen, die im Prozentbereich liegen. Aufgrund von zufälligen Koinzidenzen der Absorptionslinien von Methan, das in der Regel mehr als 90 % des Sicker-gases ausmacht, mit den Emissionslinien von Lasern sind absorptions-spektroskopische Untersuchungen höchster Nachweisempfindlichkeit möglich.

Abschätzungen haben ergeben, daß durch LASER-Differentialabsorption eine minimale Methankonzentration von 0,07 ppm auf 100 m Meßstrecke (13) nachgewiesen werden kann.

Bei Ausnutzung dieses Effektes für ein Fernmeßverfahren, das flächige Abbildungen der Gaskonzentration erzeugt, ist ein hoher Nutzen für die Prospektion von Erdöl- und Erdgaslagerstätten denkbar.

5.3 Vorschlag für ein flugzeuggetragenes Seitensicht-Laser-Radar-Gerät (LIDAR)

Eine denkbare Weiterentwicklung des flugzeuggetragenen Laser-Fernanalysegerätes wäre die Verwendung eines abstimmbaren gepulsten TEA-CO₂-Lasers nach dem Prinzip des Seitensichtradars zur Erzeugung flächenhafter Abbildungen der Erdoberfläche ohne mechanische Querabtastrichtung. Die Laser-Strahlung würde in einer Zylinderoptik fächerartig aufgeweitet und so die Oberfläche seitwärts des Geräteträgers streifenförmig beleuchtet. Aufgrund der Laufzeit eines rückgestreuten Laser-Impulses kann auf die geometrische Zuordnung quer zur Flugrichtung geschlossen werden. Die Aneinanderreihung der einzelnen Laser-Schüsse gibt so ein zeilenförmiges Bild der Erdoberfläche (Abb. 54).

Die hohe Leistungsdichte des TEA-Laser-Pulses ermöglicht die Verwendung der Direktempfangsmethode im Gegensatz zu der empfindliche-

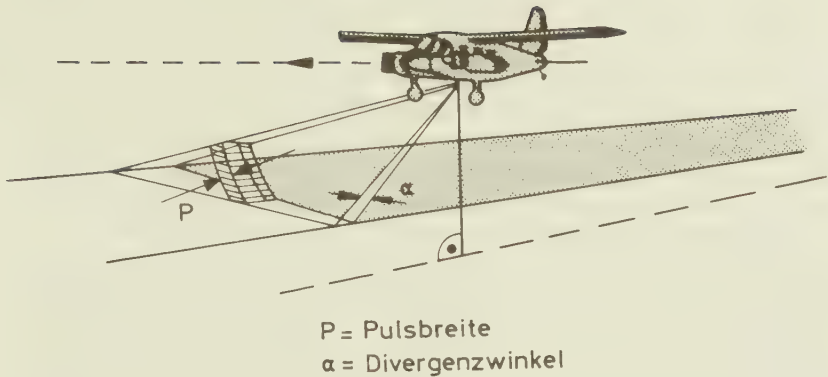


Abb. 54: Prinzip des Seitensicht-Lidar

ren aber aufwendigeren Superheterodynmethodem des entwickelten Experimentalgerätes.

Ferner kann, bedingt durch die hohe Bündelbarkeit der Laser-Strahlung, das Prinzip der realen Apertur angewendet werden und somit der hohe Aufwand bei der Datenverarbeitung beim Prinzip der synthetischen Apertur vermieden werden.

Eine weitere Erhöhung des Informationsgehaltes der Laser-Rückstreuungsmessungen wird die Untersuchung von Polarisierungseffekten bringen, die sich bei dem vorgeschlagenen Laser-System prinzipiell einfach durchführen läßt.

5.4 Vorschlag einer Sonde für laserspektroskopische Untersuchungen in Erdbohrlöchern

Eine weitere Nutzenanwendung der Laser-Infrarot-Spektroskopie könnte die Analyse des anstehenden Gesteins in Erdbohrungen werden. Ähnlich wie bei Flugzeugfernmessungen wird im vorgeschlagenen Gerät die Strahlung eines Lasers, der in einer Sonde in das Bohrloch abgelassen wird, auf die Bohrlochwand gerichtet und die spektrale Intensität des rückgestreuten Laserlichtes gemessen. Wegen der geringen zu überbrückenden Entfernung können Halbleiterlaser Verwendung finden, die sich über einen weiten Spektralbereich abstimmen lassen, in der Handhabung einfacher sind und wesentlich kleinere Abmaße besitzen.

Im folgenden wird ein Ausführungsbeispiel einer Infrarotanalyse-Sonde näher erläutert.

Abb. 55 zeigt schematisch einen Längsschnitt durch das Bohrloch mit darin befindlicher Kapsel in aufgebrochenem Zustand,

Abb. 56 zeigt in vergrößertem Maßstab die optische Einrichtung zur Erzeugung und Auswertung des Meßstrahles und des Referenzstrahles und

Abb. 57 zeigt ein Blockschaltbild des elektrischen Systems, das der optischen Einrichtung nach Abb. 56 zugeordnet ist.

Gemäß Abb. 55 wird in ein Bohrloch 10 eine Kapsel 11 hinabgelassen. Das Zugseil 12 enthält die Kabel für die Stromversorgung der in der Kapsel befindlichen elektrischen Einrichtungen und die Meßsignalleitung, die die ermittelten Meßwerte nach oben leitet.

In der Seitenwand der Kapsel 11 befindet sich ein Fenster 13, durch das ein Meßstrahl 14 senkrecht gegen die Wand des Bohrloches gerichtet wird. Auf der dem Fenster 13 gegenüberliegenden Seite besitzt die Kapsel eine Andruckfeder 15, die sich elastisch an der Bohrlochwand abstützt und dafür sorgt, daß das Fenster 13 sich stets wenigstens annähernd in gleichem Abstand von der Bohrlochwand befindet. Die Kapsel 11 ist vollständig dicht abgeschlossen und mit Ausnahme des Fensters 13 undurchsichtig. In ihrem Innern befindet sich ein Gasmolekül- oder Halbleiterlaser 16, dessen Laserstrahl 17 nach unten gerichtet ist und auf einen unter 45° gegenüber der Vertikalen geneigten Strahlteilerspiegel 18 trifft. Der an dem Spiegel 18 reflektierte (horizontale) Laserstrahl bildet den Meßstrahl. Er geht durch eine Sammellinse 19 und anschließend durch das Fenster 13 hindurch. An der Bohrlochwand wird der Meßstrahl reflektiert und mit verringerter Intensität durch das Fenster 13 und die Linse 12 auf den Strahlteilerspiegel 18 geworfen. Hier wird der Meßstrahl geteilt. Die eine Hälfte seiner Strahlung trifft auf eine Linse 20, die auf den optischen Detektor 41 fokussiert ist. Die andere Hälfte des Meßstrahles wird auf den Laser zurückreflektiert und wird nicht ausgewertet. Derjenige Strahlungsanteil des Laserstrahles 17, der durch den Strahlteiler 18 hindurchgeht, bildet den Referenzstrahl 21. Dieser wird durch einen Umlenkspiegel 22 abgelenkt und senkrecht auf einen vertikal ausgerichteten Spiegel 23 geworfen. Von diesem wird er auf den Spiegel 22 reflektiert und zum Strahlteiler 18 zurückgeworfen. Die eine Hälfte des Referenzstrahles gelangt vom Strahlteiler 18 durch die Linse zum optischen Detektor 41, während die andere Hälfte durch den Strahlteiler 18 hindurchgeht und nicht an der Auswertung teilnimmt.

Zwischen dem Strahlteiler 18 und der Linse 19 sowie zwischen den Spiegeln 22 und 23 befindet sich eine Chopperscheibe 24 mit horizontal ausgerichteter Achse, die zwei Lochkreise mit unterschiedlichen Durchmesser aufweist. Die Löcher eines jeden Lochkreises befinden sich in gegenseitigem Abstand voneinander. Durch die Löcher 25 des einen Lochkreises geht der Meßstrahl 14 hindurch und durch die Löcher 26 des anderen Lochkreises geht der Referenzstrahl 21 hindurch. Die Löcher beider Lochkreise sind umfangmäßig gegeneinander versetzt und

haben unterschiedliche Anzahlen. Die Lochscheibe 24 wird von einem Choppermotor 27 gedreht.

Durch die Löcher des Lochkreises 25 wird der Meßstrahl 14 in bestimmter Weise moduliert, d. h. er wird in einem bestimmten Rhythmus jeweils unterbrochen. In gleicher Weise wird durch die Löcher des Lochkreises 26 der Referenzstrahl moduliert.

Beide Strahlen treffen auf den optischen Detektor 21, dem gemäß Abb. 57 ein Verstärker 28 nachgeschaltet ist, der das aus dem modulierten Meßsignal und dem modulierten Referenzsignal erzeugte Gesamtsignal verstärkt und an den Lock-in-Verstärker 29 weiterleitet. Der Lock-in-Verstärker 29 besitzt zwei Steuereingänge 30, 31, an die von dem Chopper 24, 27 elektrische Signale gelegt werden, die der durch die Lochreihe 25 bzw. durch die Lochreihe 26 erzeugten Frequenz entsprechen. Die Modulationsfrequenz des Meßstrahles 14 (Lochreihe 25) liegt am Steuereingang 30, während am Steuereingang 31 die Modulationsfrequenz des Referenzstrahles 21 (Lochkreis 26) liegt. In dem Lock-in-Verstärker 29 werden nun, gesteuert durch die an den Leitungen 30 und 31 anstehenden Frequenzen, das Meßsignal und das Referenzsignal der Eingangsleitung 32 voneinander getrennt. Das Meßsignal wird an Leitung 33 und das Referenzsignal an Leitung 34 erzeugt. Beide Leitungen werden je einem Eingang eines Ratiometers 35 zugeführt, das das Verhältnis Meßsignal zu Referenzsignal bildet und den Verhältniswert an eine Anzeigevorrichtung 36 weiterleitet.

Durch die Referenzstrahlerzeugung und die anschließende Verhältnisbildung wird der Absolutwert der Amplitude des Laserstrahles 17 eliminiert. Die Intensität des Laserstrahles 17 kann sich daher ohne das Meßergebnis zu beeinflussen, z. B. in Abhängigkeit von der jeweiligen Strahlungsfrequenz, verändern.

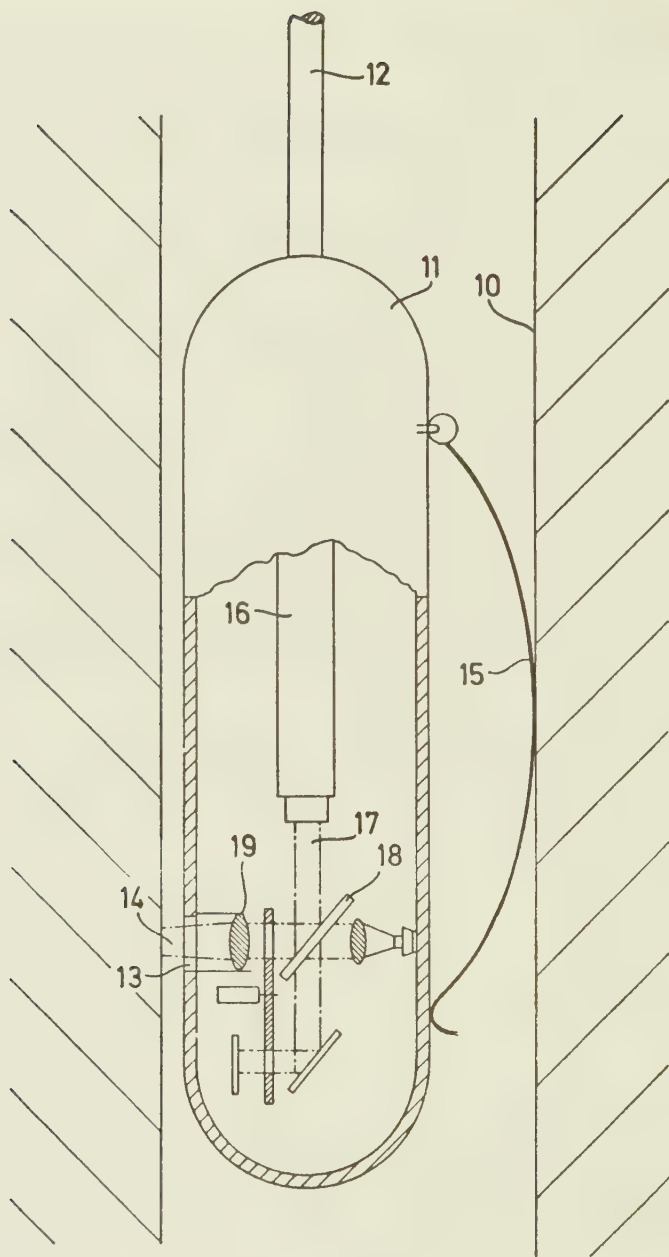


Abb. 55: Schematischer Längsschnitt durch die Bohrlochsonde

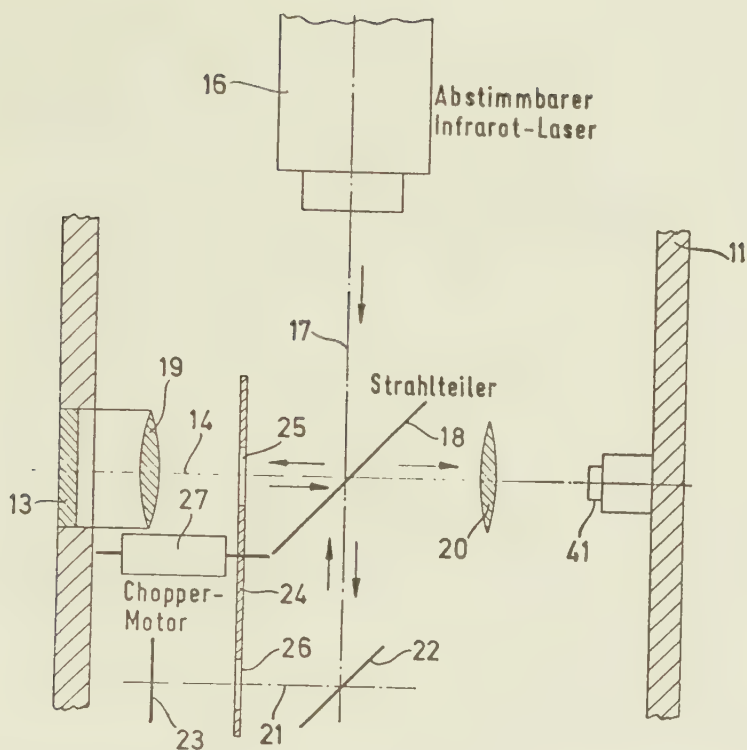


Abb. 56: Optische Einrichtung der Bohrlochsonde

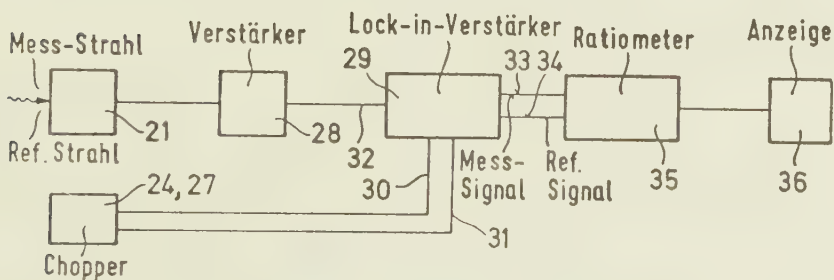


Abb. 57: Blockschaltbild des elektrischen Systems

6. Zusammenfassung

Es wird der Vorschlag gemacht, mit Hilfe der Laser-Technologie die Methode der Identifikation von Mineralen aufgrund ihres optisch-selektiven Rückstreuverhaltens für infrarote Strahlung (Reststrahlen) für ein Fernerkundungsverfahren zu nutzen.

Mit Hilfe einer Laserspektroskopischen Laboreinrichtung konnte nachgewiesen werden, daß aufgrund der besonderen Lasereigenschaften die klassischen photometrischen Methoden der Rückstreuungsmessung infraroter Strahlung hinsichtlich der Interpretierbarkeit der Signaturen übertroffen werden.

Aufbauend auf die Laborergebnisse konnten mit einem flugzeuggetragenen Zwei-Frequenz-Laserspektrometer erste Mineralanalysen der überflogenen Erdoberfläche aus Höhen bis zu 1000 m durchgeführt werden.

Für die Weiterentwicklung des Verfahrens wird ein zweidimensional oberflächenanalysierendes Laser-Radar-Gerät nach dem Seitensichtprinzip, ein Verfahren zur Aufsuchung von Kohlenwasserstofflagerstätten aufgrund der selektiven Absorption von Kohlenwasserstoff-Sickergasen und eine Bohrlochsonde zur Analyse des anstehenden Gesteins in Erdbohrungen vorgeschlagen.

7. Literaturverzeichnis

- (1) Adler, H. H. und Kerr, P. F. „Infrared Study of Aragonite and Calcite“ *The American Mineralogist*, Vol. 47; 1962
- (2) Beutelspacher, H. „Beiträge zur Ultrarotspektroskopie von Bodenkolloiden“ *Landwirtschaftliche Forschung*, Bd. 8, S. 7; 1955/56
- (3) Brunel, R. und Vierende, R. „Spectres de réflexion infrarouge de minéraux monocristallins ou en poudre I“ *Bull. Soc. fr. Mineral. Cristallogr.* Bd. 93, S. 328—340; 1970
- (4) Brügel, W. „Einführung in die Ultrarotspektroskopie“ Dr. Dietrich Steinkopf Verlag, Darmstadt; 1962
- (5) Coblenz, W. „Investigations of Infrared Spectra“ Carnegie Institution of Washington; 1905
- (6) Coblenz, W. „Investigations of Infrared Spectra“ Carnegie Institution of Washington; 1906
- (7) Collis, R. T. H. „Laser Applications in Remote Sensing for Environmental Sciences“ Springer Verlag 1976
- (8) Cross, A. D. „Introduction to Practical Infra-Red Spectroscopy“ Imperial College of Science & Technology, Butterworths Scientific Publ.; 1960
- (9) Englisch, W.; Gürs, K.; Jetter, H. „Messung von Luftverunreinigungen und natürlichen Bestandteilen der Luft durch LASER-Satelliten-Fernanalyse“ Battelle-Institut, Frankfurt; Bericht für GfW m. b. H. unter Vertrag RV 11 — V 4 47/73 (7) — TL 30; 1973
- (10) Grim, „Infrared Spectra of the Clay Minerals“ McGraw-Hill Book Company; 1968
- (11) Grimsehl „Lehrbuch der Physik“ B. G. Teubner Verlagsges., Leipzig; 1962
- (12) Hayashi, H. und Ionuma, K. „Relationship between Infrared Absorption Spectra in the Region of 450 — 900 cm^{-1} and Chemical Composition of Chlorite“, *The American Mineralogist*, Vol. 50; 1965
- (13) Hinkley, E. D. „Laser Monitoring of the Atmosphere“ Springer Verlag 1976
- (14) Hunt, J. M.; Wisherd, M. P.; Bonham, L. C. „Infrared Absorption Spectra of Minerals and other Inorganic Compounds“, *Analytical Chemistry*, Volume 22, No. 12; 1950
- (15) Hunt, J. M.; Turner, D. S. „Determination of Mineral Constituents of Rocks by Infrared Spectroscopy“, *Analytical Chemistry*, Volume 25, No. 8; 1953

- (16) Keller, W. D.; Spotts, H. J.; Biggs, D. L. „Infrared Spectra of some Rockforming Minerals“, American Journal of Science, Vol. 250; 1952
- (17) Lloyd M. Logan „Compositional Implications of Christiansen Frequency Maximums for Infrared Remote Sensing Applications“ Journal of Geophysical Research Aug. 1973
- (18) Lyon, R. J. P.; Tuddenham, W. M. „Quantitative Mineralogy as a Guide in Exploration“, Mining Engineering; 1959
- (19) Lyon, R. J. P. „Infrared Absorption Spectroscopy“
- (20) Milkey, R. G. „Infrared Spectra of some Tectosilicates“ The American Mineralogist, Vol. 45; 1960
- (21) Miller F. und Wilkins, C. H. „Infrared Spectra and Characteristic Frequencies of Inorganic Ions“, Analytical Chemistry, Vol. 24; 1952
- (22) Moenke, H. „Ultrarotspektralphotometrie und Silikatforschung“, Silikattechnik, Bd. 12, Nr. 7; 1961
- (23) Moenke, H. „Ultrarotspektralphotometrische Differenzierung von Mineralien der Granatgruppe im Spektralbereich 400 bis 650 cm⁻¹“, VEB Carl Zeiss, Jenaer Nachrichten 9; 1961
- (24) Moenke, H. „Entwicklung, Stand und Möglichkeiten der Ultrarotspektralphotometrie von Mineralien“ Akademie Verlag Berlin; 1962
- (25) Nahin, P. G. „Infrared Analysis of Clays and Related Minerals“, Proc. 1st National Conference on Clays and Clay Minerals; 1952
- (26) Pohl, R. W. „Optik und Atomphysik“; 1963
- (27) Saksena, B. D. „Infrared Absorption Spectra of α -Quartz between 4 and 15 Microns“, Proc. phys. Soc., London; 1972
- (28) Schulz, P. „Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern“, Verl. G. Braun, Karlsruhe; 1968
- (29) Steinmann, C. R. „Untersuchungen zur Fernerkundung von Gesteinen aufgrund des Reflexionsverhaltens für LASER-Strahlung im Reststrahlenbereich“, Diplom-Arbeit TU Berlin; 1973
- (30) Steinmann, C. R. „Verfahren zur chemischen und kristallographischen Fernanalyse der Erdoberfläche“, Deutsches Patentamt; Patentschrift 2517631; 1976
- (31) Steinmann, C. R. „Vorrichtung zur chemischen und mineralogischen Analyse des anstehenden Gesteins in Erdbohrungen“ Deutsches Patentamt, P 2702332.1; 1977

- (32) Steinmann, C. R. „Remote Infrared Spectroscopy of the Earth“,
Proc. 11th International Symposium on Remote Sensing of En-
vironment“, Ann Arbor, Mich.; 1977
- (33) Szymanski „Progress in Infrared Spectroscopy“
Proc. 6th, 7th Ann. Infr. Spec. Inst. N. Y. Plenum Press, N. Y.;
1964
- (34) Tarte, P. „Recherches sur le spectre infrarouge des silicates“,
Proc. Journées internationales d'études Céramique, Verre,
Brussel; 1959
- (35) Thompson, C. S.; Wadsworth, M. E. „Determination of the Composi-
tion of Plagioclase Feldspars by means of Infrared Spectro-
scopy“, University of Utah, Salt Lake City, Utah; 1960
- (36) Tuddenham, W. M.; Lyon, R. J. P. „Relation of Infrared Spectra and
Chemical Analysis for some Chlorites and Related Minerals“,
Analytical Chemistry, Vol. 31, No. 3; 1959
- (37) Tuddenham, W. M.; Lyon, R. J. P. „Infrared Techniques in the Iden-
tification and Measurement of Minerals“
Analytical Chemistry, Vol. 32, No. 12; 1960
- (38) Vedder, W. und Hornig, D. F. „Infra-Red Spectra of Crystals“
Frick Chemical Laboratory, Princeton University, Princeton,
N. J.; 1961
- (39) Vedder, W. „Correlations between Infrared Spectrum and Chemical
Composition of Mica“, The American Mineralogist, Vol. 49; 1964
- (40) Wachter, B. G. und Lyon, R. J. P. „Infrared Mineralogical Tech-
niques for Ore Search“, Stanford University, Dep. of Mineral En-
gineering; 1970
- (41) Wiesemann, W. und Englisch, W. „Messungen von Verunreinigun-
gen und natürlichen Bestandteilen der Atmosphäre durch
LASER-Satelliten-Fernanalyse“, Battelle-Institut, Frankfurt, Be-
richt für DFVLR unter Vertrag Nr. 01-TL 015-V 12 WRT 2074; 1976
- (42) Wolff, R. G. „Structural Aspects of Kaolinite Using Infrared Absorp-
tion“, The American Mineralogist, Vol. 48; 1963

8. Anhang

8.1 Mögliche Wellenlängen des CO₂-Lasers

Die nachfolgende Linientabelle wurde anhand existierender Aufstellungen und durch Auswertung der neueren und neuesten Literatur von R. Beck, W. Englisch und K. Gürs, Battelle-Institut Frankfurt, zusammengestellt.

Linien, die mit ε bezeichnet sind, wurden noch nicht beobachtet.

WELLENLÄNGE IN VACUUM [μm]		ÜBERGANG
CO ₂	4.3203	102-101 R(17)
CO ₂	4.3249	102-101 R(13)
CO ₂	4.3276	102-101 R(11)
CO ₂	4.3549	102-101 P(07)
CO ₂	4.3580	102-101 P(09)
CO ₂	4.3612	102-101 P(11)
CO ₂	4.3644	102-101 P(13)
CO ₂	4.3677	102-101 P(15)
CO ₂	4.3711	102-101 P(17)
CO ₂	4.3745	102-101 P(19)
CO ₂	4.3779	102-101 P(21)
CO ₂	4.3814	102-101 P(23)
CO ₂	4.3849	102-101 P(25)
CO ₂	4.314	101-100 R(08) C[12]O[16, 18]
CO ₂	4.340	101-100 P(10) C[12]O[16, 18]
CO ₂	4.354	101-100 P(19) C[12]O[16, 18]
CO ₂	4.346	101-100 R(08) C[12]O[18]2
CO ₂	4.371	101-100 P(10) C[12]O[18]2
CO ₂	4.377	101-100 P(14) C[12]O[18]2
CO ₂	4.382	101-100 P(18) C[12]O[18]2
CO ₂	4.385	101-100 P(20) C[12]O[18]2
CO ₂	4.392	101-100 P(24) C[12]O[18]2
CO ₂	4.398	101-100 P(28) C[12]O[18]2
CO ₂	ε 9.0702655	001-020 R(70)
CO ₂	ε 9.0757663	001-020 R(68)
CO ₂	ε 9.0814571	001-020 R(66)
CO ₂	ε 9.0873410	001-020 R(64)
CO ₂	9.0934211	001-020 R(62)
CO ₂	9.0997003	001-020 R(60)
CO ₂	9.1061815	001-020 R(58)
CO ₂	9.1128676	001-020 R(56)
CO ₂	9.1197615	001-020 R(54)
CO ₂	9.1268660	001-020 R(52)
CO ₂	9.1341839	001-020 R(50)
CO ₂	9.1417179	001-020 R(48)
CO ₂	9.1494708	001-020 R(46)
CO ₂	9.1574453	001-020 R(44)

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	9.1656440	001-020 R(42)
CO2	9.1740695	001-020 R(40)
CO2	9.1827244	001-020 R(38)
CO2	9.1916114	001-020 R(36)
CO2	9.2007329	001-020 R(34)
CO2	9.2100915	001-020 R(32)
CO2	9.2196895	001-020 R(30)
CO2	9.2295296	001-020 R(28)
CO2	9.2396141	001-020 R(26)
CO2	9.2499453	001-020 R(24)
CO2	9.2605258	001-020 R(22)
CO2	9.2713577	001-020 R(20)
CO2	9.2824434	001-020 R(18)
CO2	9.2937852	001-020 R(16)
CO2	9.3053853	001-020 R(14)
CO2	9.3172460	001-020 R(12)
CO2	9.3293695	001-020 R(10)
CO2	9.3417579	001-020 R(08)
CO2	9.3544134	001-020 R(06)
CO2	9.3673380	001-020 R(04)
CO2	9.3805340	001-020 R(02)
CO2	9.3940033	001-020 R(00)
CO2	9.4147242	001-020 P(02)
CO2	9.4288857	001-020 P(04)
CO2	9.4433275	001-020 P(06)
CO2	9.4580515	001-020 P(08)
CO2	9.4730598	001-020 P(10)
CO2	9.4883540	001-020 P(12)
CO2	9.5039361	001-020 P(14)
CO2	9.5198079	001-020 P(16)
CO2	9.5359711	001-020 P(18)
CO2	9.5524275	001-020 P(20)
CO2	9.5691788	001-020 P(22)
CO2	9.5862267	001-020 P(24)
CO2	9.6035727	001-020 P(26)
CO2	9.6212185	001-020 P(28)
CO2	9.6391656	001-020 P(30)
CO2	9.6574156	001-020 P(32)
CO2	9.6750700	001-020 P(34)
CO2	9.6948301	001-020 P(36)
CO2	9.7139973	001-020 P(38)
CO2	9.7334730	001-020 P(40)
CO2	9.7532586	001-020 P(42)
CO2	9.7733552	001-020 P(44)
CO2	9.7937640	001-020 P(46)
CO2	9.8144862	001-020 P(48)
CO2	9.8355229	001-020 P(50)

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	9.8568751	001-020 P(52)
CO2	9.8785439	001-020 P(54)
CO2	9.9005300	001-020 P(56)
CO2	9.9228344	001-020 P(58)
CO2	9.9454579	001-020 P(60)
CO2	9.9684012	001-020 P(62)
CO2	9.9916650	001-020 P(64)
CO2	10.8152498	001-020 P(66)
CO2	ε 10.0391561	001-020 P(68)
CO2	ε 10.0633844	001-020 P(70)
CO2	ε 10.0879349	001-020 P(72)
CO2	ε 9.9985568	001-100 R(70)
CO2	ε 10.0049238	001-100 R(68)
CO2	ε 10.0115934	001-100 R(66)
CO2	ε 10.0185643	001-100 R(64)
CO2	10.0258352	001-100 R(62)
CO2	10.0334048	001-100 R(60)
CO2	10.0412720	001-100 R(58)
CO2	10.0494358	001-100 R(56)
CO2	10.0578953	001-100 R(54)
CO2	10.0666497	001-100 R(52)
CO2	10.0756984	001-100 R(50)
CO2	10.0850408	001-100 R(48)
CO2	10.0946764	001-100 R(46)
CO2	10.1046049	001-100 R(44)
CO2	10.1148262	001-100 R(42)
CO2	10.1253400	001-100 R(40)
CO2	10.1361464	001-100 R(38)
CO2	10.1472454	001-100 R(36)
CO2	10.1586374	001-100 R(34)
CO2	10.1703225	001-100 R(32)
CO2	10.1823014	001-100 R(30)
CO2	10.1945745	001-100 R(28)
CO2	10.2071425	001-100 R(26)
CO2	10.2200062	001-100 R(24)
CO2	10.2331666	001-100 R(22)
CO2	10.2466246	001-100 R(20)
CO2	10.2603814	001-100 R(18)
CO2	10.2744384	001-100 R(16)
CO2	10.2887967	001-100 R(14)
CO2	10.3034581	001-100 R(12)
CO2	10.3184241	001-100 R(10)
CO2	10.3336965	001-100 R(08)
CO2	10.3492772	001-100 R(06)
CO2	10.3651683	001-100 R(04)
CO2	10.3813718	001-100 R(02)

WELLENLÄNGE IN VACUUM [μm]		ÜBERGANG
CO2	10.3978901	001-100 R(00)
CO2	10.4232632	001-100 P(02)
CO2	10.4405795	001-100 P(04)
CO2	10.4582196	001-100 P(06)
CO2	10.4761866	001-100 P(08)
CO2	10.4944835	001-100 P(10)
CO2	10.5131136	001-100 P(12)
CO2	> 10.5320802	001-100 P(14)
CO2	> 10.5513868	001-100 P(16)
CO2	> 10.5710372	001-100 P(18)
CO2	> 10.5910352	001-100 P(20)
CO2	> 10.6113848	001-100 P(22)
CO2	> 10.6320902	001-100 P(24)
CO2	> 10.6531558	001-100 P(26)
CO2	10.6745861	001-100 P(28)
CO2	10.6963859	001-100 P(30)
CO2	10.7185600	001-100 P(32)
CO2	10.7411135	001-100 P(34)
CO2	10.7640517	001-100 P(36)
CO2	10.7873802	001-100 P(38)
CO2	10.8111046	001-100 P(40)
CO2	10.8352307	001-100 P(42)
CO2	10.8597648	001-100 P(44)
CO2	10.8847131	001-100 P(46)
CO2	10.9100823	001-100 P(48)
CO2	10.9358790	001-100 P(50)
CO2	10.9621103	001-100 P(52)
CO2	10.9887835	001-100 P(54)
CO2	11.0159060	001-100 P(56)
CO2	11.0434858	001-100 P(58)
CO2	11.0715308	001-100 P(60)
CO2	11.1000493	001-100 P(62)
CO2	11.1290499	001-100 P(64)
CO2	11.1585415	001-100 P(66)
CO2	11.1885334	001-100 P(68)
CO2	ε 11.2190349	001-100 P(70)
CO2	ε 11.2500559	001-100 P(72)
CO2	9.209171	002-021 R(39)
CO2	9.217773	002-021 R(37)
CO2	9.226615	002-021 R(35)
CO2	9.235699	002-021 R(33)
CO2	9.245029	002-021 R(31)
CO2	9.254607	002-021 R(29)
CO2	9.264436	002-021 R(27)
CO2	9.274517	002-021 R(25)
CO2	9.284854	002-021 R(23)
CO2	9.295448	002-021 R(21)

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	10.511259	002-101 P(09)
CO2	10.529654	002-101 P(11)
CO2	10.548380	002-101 P(13)
CO2	10.567440	002-101 P(15)
CO2	10.586838	002-101 P(17)
CO2	10.606578	002-101 P(19)
CO2	> 10.626664	002-101 P(21)
CO2	> 10.647099	002-101 P(23)
CO2	> 10.667888	002-101 P(25)
CO2	> 10.689036	002-101 P(27)
CO2	> 10.710547	002-101 P(29)
CO2	10.732425	002-101 P(31)
CO2	10.754676	002-101 P(33)
CO2	10.777305	002-101 P(35)
CO2	10.800317	002-101 P(37)
CO2	10.823718	002-101 P(39)
CO2	10.847513	002-101 P(41)
CO2	10.871709	002-101 P(43)
CO2	10.896312	002-101 P(45)
CO2	ε 10.921327	002-101 P(47)
CO2	ε 10.288987	003-102 R(22)
CO2	10.302426	003-102 R(20)
CO2	10.318157	003-102 R(18)
CO2	10.330184	003-102 R(16)
CO2	10.344505	003-102 R(14)
CO2	10.359124	003-102 R(12)
CO2	10.374040	003-102 R(10)
CO2	10.389256	003-102 R(08)
CO2	10.404773	003-102 R(06)
CO2	ε 10.420594	003-102 R(04)
CO2	ε 10.665124	003-102 P(22)
CO2	10.685646	003-102 P(24)
CO2	10.706519	003-102 P(26)
CO2	10.727749	003-102 P(28)
CO2	10.749339	003-102 P(30)
CO2	10.771295	003-102 P(32)
CO2	10.793621	003-102 P(34)
CO2	10.516324	003-102 P(36)
CO2	10.839408	003-102 P(38)
CO2	ε 10.862879	003-102 P(40)
CO2	10.591025	001-110 R(23)
CO2	10.789077	001-110 Q(11)
CO2	10.890184	001-110 P(11)
CO2	10.900964	001-110 P(12)
CO2	10.921469	001-110 P(14)
CO2	10.930707	001-110 P(15)

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	10.942351	001-110 P(16)
CO2	10.951486	001-110 P(17)
CO2	10.972615	001-110 P(19)
CO2	10.985266	001-110 P(20)
CO2	11.007301	001-110 P(22)
CO2	11.015934	001-110 P(23)
CO2	11.029744	001-110 P(24)
CO2	11.083630	001-110 P(29)
CO2	10.9735	011-030 P(19)
CO2	10.9950	011-030 P(21)
CO2	11.0165	011-030 P(23)
CO2	11.0300	011-030 P(24)
CO2	11.0385	011-030 P(25)
CO2	11.0535	011-030 P(26)
CO2	11.0610	011-030 P(27)
CO2	11.0760	011-030 P(28)
CO2	11.0850	011-030 P(29)
CO2	11.1000	011-030 P(30)
CO2	11.1070	011-030 P(31)
CO2	11.1235	011-030 P(32)
CO2	11.1315	011-030 P(33)
CO2	11.1485	011-030 P(34)
CO2	11.1555	011-030 P(35)
CO2	11.1736	011-030 P(36)
CO2	11.1790	011-030 P(37)
CO2	11.1980	011-030 P(38)
CO2	11.2035	011-030 P(39)
CO2	11.2235	011-030 P(40)
CO2	11.2295	011-030 P(41)
CO2	11.2495	011-030 P(42)
CO2	11.2545	011-030 P(43)
CO2	11.2770	011-030 P(44)
CO2	11.2805	011-030 P(45)
CO2	? 13.144	
CO2	13.154	?140-050 Q
CO2	? 13.159	
CO2	13.541	?210-120 Q
CO2	13.87	100-010 Q
CO2	14.1	101-011 Q
CO2	14.16	100-010 P(19)
CO2	14.19	100-010 P(21)
CO2	14.21	100-010 P(23)
CO2	16.586	?140-130 Q
CO2	? 16.597	
CO2	? 17.023	
CO2	17.029	?031-021 Q

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	?	17.036	
CO2	?	17.048	
CO2	?	17.370	
CO2		17.376	
CO2	?	17.390	?240-230 Q
CO2	ε	8.98770094	001-020 R(50) C[12]O[18]2
CO2		8.99496997	001-020 R(48) C[12]O[18]2
CO2		9.00240216	001-020 R(46) C[12]O[18]2
CO2		9.00999899	001-020 R(44) C[12]O[18]2
CO2		9.01776190	001-020 R(42) C[12]O[18]2
CO2		9.02569233	001-020 R(40) C[12]O[18]2
CO2		9.03379171	001-020 R(38) C[12]O[18]2
CO2		9.04206146	001-020 R(36) C[12]O[18]2
CO2		9.05050297	001-020 R(34) C[12]O[18]2
CO2		9.05911764	001-020 R(32) C[12]O[18]2
CO2		9.06790685	001-020 R(30) C[12]O[18]2
CO2		9.07687197	001-020 R(28) C[12]O[18]2
CO2		9.08601437	001-020 R(26) C[12]O[18]2
CO2		9.09533538	001-020 R(24) C[12]O[18]2
CO2		9.10483634	001-020 R(22) C[12]O[18]2
CO2		9.11451859	001-020 R(20) C[12]O[18]2
CO2		9.12438343	001-020 R(18) C[12]O[18]2
CO2		9.13443217	001-020 R(16) C[12]O[18]2
CO2		9.14466611	001-020 R(14) C[12]O[18]2
CO2		9.15508653	001-020 R(12) C[12]O[18]2
CO2		9.16569469	001-020 R(10) C[12]O[18]2
CO2		9.17649187	001-020 R(08) C[12]O[18]2
CO2		9.18747931	001-020 R(06) C[12]O[18]2
CO2		9.19865824	001-020 R(04) C[12]O[18]2
CO2		9.21002991	001-020 R(02) C[12]O[18]2
CO2	ε	9.22159552	001-020 R(00) C[12]O[18]2
CO2	ε	9.23931022	001-020 P(02) C[12]O[18]2
CO2		9.25136594	001-020 P(04) C[12]O[18]2
CO2		9.26361978	001-020 P(06) C[12]O[18]2
CO2		9.27607290	001-020 P(08) C[12]O[18]2
CO2		9.28872646	001-020 P(10) C[12]O[18]2
CO2		9.30158160	001-020 P(12) C[12]O[18]2
CO2		9.31463943	001-020 P(14) C[12]O[18]2
CO2		9.32790109	001-020 P(16) C[12]O[18]2
CO2		9.34136768	001-020 P(18) C[12]O[18]2
CO2		9.35504028	001-020 P(20) C[12]O[18]2
CO2		9.36891998	001-020 P(22) C[12]O[18]2
CO2		9.38300783	001-020 P(24) C[12]O[18]2
CO2		9.39730489	001-020 P(26) C[12]O[18]2
CO2		9.41181219	001-020 P(28) C[12]O[18]2
CO2		9.42653076	001-020 P(30) C[12]O[18]2

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	9.44146159	001-020	P(32)	C[12]O[18]2
CO2	9.45660568	001-020	P(34)	C[12]O[18]2
CO2	9.47196399	001-020	P(36)	C[12]O[18]2
CO2	9.48753750	001-020	P(38)	C[12]O[18]2
CO2	9.50332713	001-020	P(40)	C[12]O[18]2
CO2	9.51933381	001-020	P(42)	C[12]O[18]2
CO2	9.53555845	001-020	P(44)	C[12]O[18]2
CO2	9.55200192	001-020	P(46)	C[12]O[18]2
CO2	9.56866511	001-020	P(48)	C[12]O[18]2
CO2	9.58554884	001-020	P(50)	C[12]O[18]2
CO2	9.60265396	001-020	P(52)	C[12]O[18]2
CO2	9.61998126	001-020	P(54)	C[12]O[18]2
CO2	ε 9.63753153	001-020	P(56)	C[12]O[18]2
CO2	10.10434660	001-100	R(40)	C[12]O[18]2
CO2	10.11295490	001-100	R(38)	C[12]O[18]2
CO2	10.12186285	001-100	R(36)	C[12]O[18]2
CO2	10.13107088	001-100	R(34)	C[12]O[18]2
CO2	10.14057947	001-100	R(32)	C[12]O[18]2
CO2	10.15038920	001-100	R(30)	C[12]O[18]2
CO2	10.16050076	001-100	R(28)	C[12]O[18]2
CO2	10.17091494	001-100	R(26)	C[12]O[18]2
CO2	10.18163264	001-100	R(24)	C[12]O[18]2
CO2	10.19265484	001-100	R(22)	C[12]O[18]2
CO2	10.20398263	001-100	R(20)	C[12]O[18]2
CO2	10.21561722	001-100	R(18)	C[12]O[18]2
CO2	10.22755988	001-100	R(16)	C[12]O[18]2
CO2	10.23981204	001-100	R(14)	C[12]O[18]2
CO2	10.25237519	001-100	R(12)	C[12]O[18]2
CO2	10.26525095	001-100	R(10)	C[12]O[18]2
CO2	10.27844106	001-100	R(08)	C[12]O[18]2
CO2	10.29194733	001-100	R(06)	C[12]O[18]2
CO2	ε 10.30577171	001-100	R(04)	C[12]O[18]2
CO2	10.38758981	001-100	P(06)	C[12]O[18]2
CO2	10.40353724	001-100	P(08)	C[12]O[18]2
CO2	10.41982107	001-100	P(10)	C[12]O[18]2
CO2	10.43644425	001-100	P(12)	C[12]O[18]2
CO2	10.45340986	001-100	P(14)	C[12]O[18]2
CO2	10.47072112	001-100	P(16)	C[12]O[18]2
CO2	10.48838137	001-100	P(18)	C[12]O[18]2
CO2	10.50639411	001-100	P(20)	C[12]O[18]2
CO2	10.52476294	001-100	P(22)	C[12]O[18]2
CO2	10.54349163	001-100	P(24)	C[12]O[18]2
CO2	10.56258410	001-100	P(26)	C[12]O[18]2
CO2	10.58204439	001-100	P(28)	C[12]O[18]2
CO2	10.60187671	001-100	P(30)	C[12]O[18]2
CO2	10.62208541	001-100	P(32)	C[12]O[18]2

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	10.64267502	001-100	P(34)	C[12]O[18]2
CO2	10.66365020	001-100	P(36)	C[12]O[18]2
CO2	10.68501579	001-100	P(38)	C[12]O[18]2
CO2	10.70677681	001-100	P(40)	C[12]O[18]2
CO2	ε 10.72693842	001-100	P(42)	C[12]O[18]2
CO2	ε 9.59239947	001-020	R(38)	C[13]O[16]2
CO2	9.60168999	001-020	R(36)	C[13]O[16]2
CO2	9.61125719	001-020	R(34)	C[13]O[16]2
CO2	9.62110404	001-020	R(32)	C[13]O[16]2
CO2	9.63123346	001-020	R(30)	C[13]O[16]2
CO2	9.64164836	001-020	R(28)	C[13]O[16]2
CO2	9.65235161	001-020	R(26)	C[13]O[16]2
CO2	9.66334607	001-020	R(24)	C[13]O[16]2
CO2	9.67463455	001-020	R(22)	C[13]O[16]2
CO2	9.68621987	001-020	R(20)	C[13]O[16]2
CO2	9.69810480	001-020	R(18)	C[13]O[16]2
CO2	9.71029210	001-020	R(16)	C[13]O[16]2
CO2	9.72278448	001-020	R(14)	C[13]O[16]2
CO2	9.73558466	001-020	R(12)	C[13]O[16]2
CO2	9.74869533	001-020	R(10)	C[13]O[16]2
CO2	9.76211913	001-020	R(08)	C[13]O[16]2
CO2	9.77585872	001-020	R(06)	C[13]O[16]2
CO2	9.78991669	001-020	R(04)	C[13]O[16]2
CO2	ε 9.80429565	001-020	R(02)	C[13]O[16]2
CO2	ε 9.85718656	001-020	P(04)	C[13]O[16]2
CO2	9.87304135	001-020	P(06)	C[13]O[16]2
CO2	9.88923095	001-020	P(08)	C[13]O[16]2
CO2	9.90575779	001-020	P(10)	C[13]O[16]2
CO2	9.92262428	001-020	P(12)	C[13]O[16]2
CO2	9.93983281	001-020	P(14)	C[13]O[16]2
CO2	9.95738572	001-020	P(16)	C[13]O[16]2
CO2	9.97528536	001-020	P(18)	C[13]O[16]2
CO2	9.99353402	001-020	P(20)	C[13]O[16]2
CO2	10.01213399	001-020	P(22)	C[13]O[16]2
CO2	10.03108747	001-020	P(24)	C[13]O[16]2
CO2	10.05039672	001-020	P(26)	C[13]O[16]2
CO2	10.07006390	001-020	P(28)	C[13]O[16]2
CO2	10.09009116	001-020	P(30)	C[13]O[16]2
CO2	10.13123435	001-020	P(34)	C[13]O[16]2
CO2	10.15235439	001-020	P(36)	C[13]O[16]2
CO2	10.17384275	001-020	P(38)	C[13]O[16]2
CO2	ε 10.19570139	001-020	P(40)	C[13]O[16]2
CO2	10.58841900	001-100	R(46)	C[13]O[16]2
CO2	10.60062644	001-100	R(44)	C[13]O[16]2
CO2	10.61310290	001-100	R(42)	C[13]O[16]2

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	10.62584867	001-100	R(40)	C[13]O[16]2
CO2	10.63586409	001-100	R(38)	C[13]O[16]2
CO2	10.65214962	001-100	R(36)	C[13]O[16]2
CO2	10.66570577	001-100	R(34)	C[13]O[16]2
CO2	10.67953319	001-100	R(32)	C[13]O[16]2
CO2	10.69363257	001-100	R(30)	C[13]O[16]2
CO2	10.70800473	001-100	R(28)	C[13]O[16]2
CO2	10.72265056	001-100	R(26)	C[13]O[16]2
CO2	10.73757106	001-100	R(24)	C[13]O[16]2
CO2	10.75276730	001-100	R(22)	C[13]O[16]2
CO2	10.76624046	001-100	R(20)	C[13]O[16]2
CO2	10.78399183	001-100	R(18)	C[13]O[16]2
CO2	10.80002276	001-100	R(16)	C[13]O[16]2
CO2	10.81633473	001-100	R(14)	C[13]O[16]2
CO2	10.83292931	001-100	R(12)	C[13]O[16]2
CO2	10.84980818	001-100	R(10)	C[13]O[16]2
CO2	10.86697309	001-100	R(08)	C[13]O[16]2
CO2	10.88442594	001-100	R(06)	C[13]O[16]2
CO2	10.90216870	001-100	R(04)	C[13]O[16]2
CO2	ε 11.92020346	001-100	R(02)	C[13]O[16]2
CO2	ε 11.93853242	001-100	R(00)	C[13]O[16]2
CO2	ε 11.96658256	001-100	P(02)	C[13]O[16]2
CO2	11.98565737	001-100	P(04)	C[13]O[16]2
CO2	11.00503495	001-100	P(06)	C[13]O[16]2
CO2	11.02471801	001-100	P(08)	C[13]O[16]2
CO2	11.04470940	001-100	P(10)	C[13]O[16]2
CO2	11.06501204	001-100	P(12)	C[13]O[16]2
CO2	11.08562903	001-100	P(14)	C[13]O[16]2
CO2	11.10656357	001-100	P(16)	C[13]O[16]2
CO2	11.12781897	001-100	P(18)	C[13]O[16]2
CO2	11.14939871	001-100	P(20)	C[13]O[16]2
CO2	11.17100639	001-100	P(22)	C[13]O[16]2
CO2	11.19354572	001-100	P(24)	C[13]O[16]2
CO2	11.21612059	001-100	P(26)	C[13]O[16]2
CO2	11.23903501	001-100	P(28)	C[13]O[16]2
CO2	11.26229313	001-100	P(30)	C[13]O[16]2
CO2	11.28589928	001-100	P(32)	C[13]O[16]2
CO2	11.30985791	001-100	P(34)	C[13]O[16]2
CO2	11.33417365	001-100	P(36)	C[13]O[16]2
CO2	11.35885125	001-100	P(38)	C[13]O[16]2
CO2	11.38389568	001-100	P(40)	C[13]O[16]2
CO2	ε 11.40931204	001-100	P(42)	C[13]O[16]2
CO2	ε 10.49282306	001-100	R(42)	C[13]O[18]2
CO2	10.50270688	001-100	R(40)	C[13]O[18]2
CO2	10.51287542	001-100	R(38)	C[13]O[18]2
CO2	10.52332884	001-100	R(36)	C[13]O[18]2

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	10.53406738	001-100 R(34) C[13]O[18]2
CO2	10.54509140	001-100 R(32) C[13]O[18]2
CO2	10.55640135	001-100 R(30) C[13]O[18]2
CO2	10.56799780	001-100 R(28) C[13]O[18]2
CO2	10.57988138	001-100 R(26) C[13]O[18]2
CO2	10.59205288	001-100 R(24) C[13]O[18]2
CO2	10.60451316	001-100 R(22) C[13]O[18]2
CO2	10.61726318	001-100 R(20) C[13]O[18]2
CO2	10.63030402	001-100 R(18) C[13]O[18]2
CO2	10.64363687	001-100 R(16) C[13]O[18]2
CO2	10.65726303	001-100 R(14) C[13]O[18]2
CO2	10.67118389	001-100 R(12) C[13]O[18]2
CO2	10.68540097	001-100 R(10) C[13]O[18]2
CO2	10.69991589	001-100 R(08) C[13]O[18]2
CO2	10.71473039	001-100 R(06) C[13]O[18]2
CO2	ϵ 11.72984633	001-100 R(04) C[13]O[18]2
CO2	ϵ 11.81846619	001-100 P(06) C[13]O[18]2
CO2	11.83559484	001-100 P(08) C[13]O[18]2
CO2	11.85304268	001-100 P(10) C[13]O[18]2
CO2	11.87081258	001-100 P(12) C[13]O[18]2
CO2	11.88890760	001-100 P(14) C[13]O[18]2
CO2	11.90733089	001-100 P(16) C[13]O[18]2
CO2	11.92608578	001-100 P(18) C[13]O[18]2
CO2	11.94517571	001-100 P(20) C[13]O[18]2
CO2	11.96460427	001-100 P(22) C[13]O[18]2
CO2	11.98437521	001-100 P(24) C[13]O[18]2
CO2	11.00449241	001-100 P(26) C[13]O[18]2
CO2	11.02495992	001-100 P(28) C[13]O[18]2
CO2	11.04578194	001-100 P(30) C[13]O[18]2
CO2	11.06696282	001-100 P(32) C[13]O[18]2
CO2	11.08850708	001-100 P(34) C[13]O[18]2
CO2	11.11041941	001-100 P(36) C[13]O[18]2
CO2	11.13270467	001-100 P(38) C[13]O[18]2
CO2	11.15536788	001-100 P(40) C[13]O[18]2
CO2	ϵ 11.17841426	001-100 P(42) C[13]O[18]2
CO2	ϵ 9.49185112	001-020 R(46) C[13]O[18]2
CO2	9.49995782	001-020 R(44) C[13]O[18]2
CO2	9.50826101	001-020 R(42) C[13]O[18]2
CO2	9.51676274	001-020 R(40) C[13]O[18]2
CO2	9.52546505	001-020 R(38) C[13]O[18]2
CO2	9.53436995	001-020 R(36) C[13]O[18]2
CO2	9.54347943	001-020 R(34) C[13]O[18]2
CO2	9.55279546	001-020 R(32) C[13]O[18]2
CO2	9.56231997	001-020 R(30) C[13]O[18]2
CO2	9.57205489	001-020 R(28) C[13]O[18]2
CO2	9.58200213	001-020 R(26) C[13]O[18]2

WELLENLÄNGE IN VACUUM
[μm]

ÜBERGANG

CO2	9.59216355	001-020 R(24) C[13]O[18]2
CO2	9.60254101	001-020 R(22) C[13]O[18]2
CO2	9.61313635	001-020 R(20) C[13]O[18]2
CO2	9.62395138	001-020 R(18) C[13]O[18]2
CO2	9.63498789	001-020 R(16) C[13]O[18]2
CO2	9.64624766	001-020 R(14) C[13]O[18]2
CO2	9.65773242	001-020 R(12) C[13]O[18]2
CO2	9.66944390	001-020 R(10) C[13]O[18]2
CO2	9.68138381	001-020 R(08) C[13]O[18]2
CO2	9.69355383	001-020 R(06) C[13]O[18]2
CO2	9.70595561	001-020 R(04) C[13]O[18]2
CO2	ε 9.71859080	001-020 R(02) C[13]O[18]2
CO2	ε 9.75121048	001-020 P(02) C[13]O[18]2
CO2	9.76467517	001-020 P(04) C[13]O[18]2
CO2	9.77838035	001-020 P(06) C[13]O[18]2
CO2	9.79232753	001-020 P(08) C[13]O[18]2
CO2	9.80651821	001-020 P(10) C[13]O[18]2
CO2	9.82095385	001-020 P(12) C[13]O[18]2
CO2	9.83563588	001-020 P(14) C[13]O[18]2
CO2	9.85056572	001-020 P(16) C[13]O[18]2
CO2	9.86574476	001-020 P(18) C[13]O[18]2
CO2	9.88117435	001-020 P(20) C[13]O[18]2
CO2	9.89685583	001-020 P(22) C[13]O[18]2
CO2	9.91279050	001-020 P(24) C[13]O[18]2
CO2	9.92897965	001-020 P(26) C[13]O[18]2
CO2	9.94542451	001-020 P(28) C[13]O[18]2
CO2	9.96212632	001-020 P(30) C[13]O[18]2
CO2	9.97908626	001-020 P(32) C[13]O[18]2
CO2	9.99630549	001-020 P(34) C[13]O[18]2
CO2	10.01378513	001-020 P(36) C[13]O[18]2
CO2	10.03152628	001-020 P(38) C[13]O[18]2
CO2	10.04952999	001-020 P(40) C[13]O[18]2
CO2	10.06779729	001-020 P(42) C[13]O[18]2
CO2	10.08632916	001-020 P(44) C[13]O[18]2
CO2*	10.10512655	001-020 P(46) C[13]O[18]2
CO2	10.12419038	001-020 P(48) C[13]O[18]2
CO2	ε 10.14352152	001-020 P(50) C[13]O[18]2
CO2	11.329	001-100 R(22) C[14]O[16]2
CO2	11.346	001-100 R(20) C[14]O[16]2
CO2	11.364	001-100 R(18) C[14]O[16]2
CO2	11.382	001-100 R(16) C[14]O[16]2
CO2	11.400	001-100 R(14) C[14]O[16]2
CO2	ε 11.677	001-100 P(12) C[14]O[16]2
CO2	11.700	001-100 P(14) C[14]O[16]2
CO2	11.723	001-100 P(16) C[14]O[16]2
CO2	11.746	001-100 P(18) C[14]O[16]2

WELLENLÄNGE IN VACUUM [μm]		ÜBERGANG
CO ₂	11.770	001-100 P(20) C[14]O[16]2
CO ₂	11.794	001-100 P(22) C[14]O[16]2
CO ₂	11.819	001-100 P(24) C[14]O[16]2
CO ₂	11.843	001-100 P(26) C[14]O[16]2
CO ₂ ε	11.888	001-100 P(28) C[14]O[16]2
CO ₂	16.596	100-010 R(06) C[12]O[16, 18]
CO ₂	16.780	101-011 R(08) C[12]O[16, 18]
CO ₂	16.927	100-010 P(09) C[12]O[16, 18]
CO ₂	16.970	100-010 P(11) C[12]O[16, 18]
CO ₂	17.280	100-010 R(07) C[12]O[18]2
CO ₂	17.463	101-011 R(08) C[12]O[18]2
CO ₂	17.596	100-010 P(07) C[12]O[18]2
CO ₂	17.639	100-010 P(09) C[12]O[18]2
CO ₂	17.684	100-010 P(11) C[12]O[18]2
CO ₂	17.730	100-010 P(13) C[12]O[18]2
CO ₂	17.775	100-010 P(15) C[12]O[18]2
CO ₂	17.821	100-010 P(17) C[12]O[18]2
CO ₂	17.915	100-010 P(21) C[12]O[18]2
CO ₂	17.962	100-010 P(23) C[12]O[18]2

Lebenslauf

21. 9. 1943 geb. in Nordhausen in Thüringen
Eltern: Dr. Carl Steinmann
Liesbeth Steinmann, geb. Kölber
- 1951 — 1954 Besuch der Volksschule in Coburg und Köln
- 1954 — 1961 Besuch des nat. wiss. Gymnasiums in Köln-Mülheim
- 1961 — 1963 Industriepraktikum bei Klöckner-Humboldt-Deutz A. G.
- 1963 — 1965 Grundwehrdienst, Reserveoffizierslaufbahn
- 1965 — 1968 Besuch der Staatl. Fachhochschule Köln für Maschinenwesen
- 1968 Graduierung als Ingenieur für Maschinenbau.
Erwerb der allgemeinen Hochschulreife
- 1968 — 1970 Mitarbeiter bei der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) auf dem Gebiet der optischen Meßtechnik
- 1970 — 1975 Studium der Geologie an der Universität Köln und der Technischen Universität Berlin
- Januar 1975 Diplom-Hauptprüfung
- seit 1975 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der DFVLR im Bereich für Projektträgerschaften auf dem Gebiet der Erderkundung und Atmosphärenforschung
- April 1978 Eheschließung mit der Zahnärztin
Dr. Michaela Probst-Steinmann, geb. Probst

EMIL PATZSCHKE

GmbH & Co KG

GRAFISCHER BETRIEB

8632 Neustadt b. Coburg

Tel. 09568/54 32 u. 54 36